

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA E ELETRÔNICA**

Gabriel Piazero Hessmann

**SISTEMA AUTOMATIZADO PARA IMPOSIÇÃO
DE FALTAS EM UMA MÁQUINA SÍNCRONA
MODIFICADA**

Florianópolis

2018

Gabriel Piazero Hessmann

**SISTEMA AUTOMATIZADO PARA IMPOSIÇÃO
DE FALTAS EM UMA MÁQUINA SÍNCRONA
MODIFICADA**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Curso de Gradua-
ção em Engenharia Elétrica para
a obtenção do Grau de Bacharel
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Nelson
Jhoe Batistela

Coorientador: Helton Fernando
dos Santos

Florianópolis

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Hessmann, Gabriel Piazero
SISTEMA AUTOMATIZADO PARA IMPOSIÇÃO DE FALTAS EM
UMA MÁQUINA SÍNCRONA MODIFICADA / Gabriel Piazero
Hessmann ; orientador, Nelson Jhoe Batistela,
coorientador, Helton Fernando dos Santos, 2018.
125 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

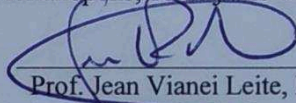
1. Engenharia Elétrica. 2. Máquina síncrona. 3.
Faltas incipientes. 4. Sensores de corrente
elétrica. I. Batistela, Nelson Jhoe. II. Santos,
Helton Fernando dos. III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica.
IV. Título.

Gabriel Piazero Hessmann

**SISTEMA AUTOMATIZADO PARA IMPOSIÇÃO DE FALTAS
EM UMA MÁQUINA SÍNCRONA MODIFICADA**

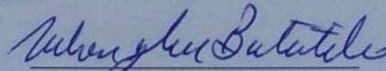
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aprovado, em sua forma final, pela Banca Examinadora.

Florianópolis, 10 de julho de 2018.




Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso

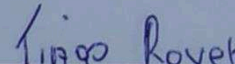
Banca Examinadora:



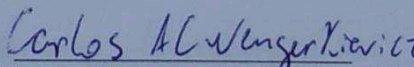
Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.
Orientador – UFSC



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Membro da Banca – UFSC



Eng. Eletricista Tiago Rover, Esp.
Membro da Banca – ProMotion S.A.



Eng. Eletricista Carlos Alexandre Corrêa Wengerkievicz, M.Sc.
Membro da Banca – UFSC

RESUMO

Faltas incipientes podem levar uma máquina elétrica a sofrer uma falha, tornando-a inoperante e implicando em altos custos com paradas inesperadas. Assim, há desenvolvimento de técnicas e métodos para detectarem o surgimento de faltas incipientes. A análise de alterações no campo magnético de máquinas síncronas possibilita a detecção de faltas nestes equipamentos. Estudos sobre esta técnica estão em desenvolvimento na Universidade Federal de Santa Catarina e são realizados em máquinas especiais, onde é possível impor faltas de maneira controlada. Este processo de imposição de faltas foi concebido para ser executado manualmente pelo operador. A proposta desse trabalho é projetar e construir um sistema automatizado de imposição de faltas em uma máquina síncrona, para substituir o processo manual. O sistema faz uso de um microcontrolador, uma IHM, sensores de corrente elétrica e relés. O sistema é dividido em placas de potência, onde ocorrem chaveamentos, e placas de controle, onde ficam o microcontrolador, a IHM e um circuito que trata o sinal dos sensores de corrente. As faltas são impostas a partir de circuitos de chaveamentos, que conectam ou desconectam terminais especiais da máquina.

Palavras-chave: Máquina síncrona. Faltas incipientes. Sensores de corrente elétrica.

ABSTRACT

Incipient faults can cause an electric machine to fail, making it inoperative, and entailing high costs with unexpected shut-downs. Thus, techniques and methods have been developed to detect the occurrence of incipient faults. The analysis of changes in the magnetic field of synchronous machines makes it possible to detect faults in these equipments. Studies on this technique are under development at the Federal University of Santa Catarina and are performed in special machines, where it is possible to impose faults in a controlled manner. This fault enforcement process was designed to be executed manually by the operator. The purpose of this work is to design and construct an automated system for fault imposition in a synchronous machine, to replace the manual process. The system uses a microcontroller, an HMI, electric current sensors and relays. The system is divided into power boards, where switches occur, and control boards, for the microcontroller, the HMI and a circuit that treats the signal of the current sensors. The faults are imposed from switching circuits, which connect or disconnect special terminals from the machine.

Keywords: Synchronous machine. Incipient faults. Electric current sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Bancada de simulação de defeitos em máquinas síncronas.....	26
Figura 2	Conexões e chaves do modo manual de imposição de faltas.....	27
Figura 3	Enrolamento de campo da máquina síncrona de 8 polos.....	30
Figura 4	Enrolamento de armadura da máquina síncrona de 8 polos.....	31
Figura 5	Esquemático da simulação de curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator.....	32
Figura 6	Diagrama de pinos do CI ACS712.....	34
Figura 7	Medidor de corrente ACS712 aplicado em um circuito.....	35
Figura 8	Filtro passa-baixa de 1ª ordem.....	37
Figura 9	Circuito Amplificador Não-Inversor.....	38
Figura 10	Placa Arduino Mega.....	40
Figura 11	Diagrama de blocos do sistema de imposição de faltas em uma máquina síncrona.....	44
Figura 12	Placa de bornes da máquina.....	46
Figura 13	Esquemático do circuito de chaveamento do grupo de terminais ABC.....	49
Figura 14	Esquemático do circuito de chaveamento do grupo de terminais JK.....	51
Figura 15	Esquemático do circuito de chaveamento do grupo de terminais Núcleo em Curto.....	53
Figura 16	Conexões do sensor de corrente ACS712.....	54
Figura 17	Conexões da placa de potência 1.....	58

Figura 18 Vistas 3D de cima e de frente da placa de potência 1.....	59
Figura 19 Conexões da placa de potência 2.....	60
Figura 20 Vistas 3D de cima e de frente da placa de potência 2.....	61
Figura 21 Fluxograma do código programado no microcontrolador.	68
Figura 22 Conexões da placa do microcontrolador.....	72
Figura 23 Representações 3D da placa do microcontrolador.....	73
Figura 24 Sinal sobre a chave de um botão sofrendo <i>bounce</i>	79
Figura 25 Sinal sobre a chave de um botão com circuito RC para correção de <i>bounce</i>	80
Figura 26 Conexões da placa da IHM.	81
Figura 27 Representações 3D da placa da IHM.....	82
Figura 28 Sistema completo montado.	84
Figura 29 Sistema completo montado.	85
Figura 30 Sistema completo montado.	86
Figura 31 Demonstração da influência de uma peça ferromagnética na distribuição do campo magnético.....	90
Figura 32 Fotos de um sensor contruído: a esquerda do enrolamento secundário e, à direita, do sensor finalizado com a superposição do enrolamento primário.	91
Figura 33 Esquemático do circuito de referência deslocada.	93
Figura 34 Esquemático do circuito amplificador.....	94
Figura 35 Foto do circuito completo montado.	96
Figura 36 Gráfico expondo a relação entre tensão de saída e corrente de entrada do sensor.....	99

Figura 37 Relação entre sensibilidade e corrente de entrada do sensor.	100
Figura 38 Representação gráfica de sinais sofrendo diferentes tipos de interferência.	103
Figura 39 Montagem do ensaio de comparação com equipamento comercial.	105
Figura 40 Representação gráfica dos desvios dos sensores.	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Pinos usados do display LCD.....	77
Tabela 2	Relação entre corrente de entrada e tensão de saída do sensor de corrente.....	99
Tabela 3	Relação da sensibilidade do sensor para diferentes valores de corrente.....	100
Tabela 4	Correntes medidas no ensaio de comparação do sensor com um instrumento comercial.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CI	Circuito Integrado	35
IHM	Interface Homem-Máquina	37
NPN	Negativo-Positivo-Negativo	39
CLP	Controlador Lógico Programável	40
NA	Normalmente Aberto	50
NF	Normalmente Fechado	50
LCD	Display de Cristal Líquido	74
RC	Resistor-Capacitor	79
TCT	Transdutor de Corrente para Tensão	87
DC	Corrente Contínua	92
PNP	Positivo-Negativo-Positivo	93

LISTA DE SÍMBOLOS

f_c	Frequência de corte	38
V_I	Tensão de entrada	38
V_O	Tensão de saída	38
v_{sec}	Tensão induzida na bobina secundária	88
N_p	Número de espiras na bobina primária	88
N_s	Número de espiras na bobina secundária	88
H	Campo magnético	88
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo	88
V_{P-P}	Tensão de pico-a-pico	98
I_{RMS}	Corrente eficaz	98

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 MOTIVAÇÃO	22
1.2 OBJETIVO	22
2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	25
2.1 EQUIPAMENTOS USADOS	25
2.2 FALTAS A SEREM IMPOSTAS NA MÁQUINA SÍNCRONA	27
2.3 MONITORAMENTO DE CORRENTES ELÉTRI- CAS	32
2.3.1 Sensor comercial	33
2.3.2 Sensor produzido	35
2.4 CIRCUITOS	37
2.5 MICROCONTROLADOR	39
3 SISTEMA DE IMPOSIÇÃO DE FALTAS EM MÁQUINA SÍNCRONA	43
3.1 PLACAS DE POTÊNCIA	44
3.1.1 Grupo ABC	46
3.1.2 Grupo JK	50
3.1.3 Grupo Núcleo em Curto	52
3.1.4 Sensores de corrente elétrica	53
3.1.5 Circuito final	56
3.2 PLACAS DE CONTROLE	62
3.2.1 Microcontrolador	62
3.2.1.1 Entradas e saídas	63
3.2.1.2 Alimentação do sistema	65
3.2.1.3 Programação	66
3.2.1.4 Circuito final	71
3.2.2 IHM	74
3.2.2.1 Tela	74
3.2.2.2 Botões	77
3.2.2.3 Circuito final	80

3.3 SISTEMA COMPLETO	83
4 IMPLEMENTAÇÃO DE SENSORES DE CORRENTE	87
4.1 ACOPLAMENTO DE BOBINAS	88
4.2 CIRCUITO ANALÓGICO	91
4.2.1 Circuito de referência deslocada	93
4.2.2 Circuito amplificador	94
5 ENSAIOS DOS SENSORES DE CORRENTE	97
5.1 CALIBRAÇÃO DA SENSIBILIDADE	97
5.2 COMPARAÇÃO COM INSTRUMENTO COMERCIAL	101
6 CONCLUSÃO	109
6.1 CONTINUIDADE DO TRABALHO	110
REFERÊNCIAS	113
APÊNDICE A – Circuito de tratamento dos sinais dos sensores de corrente	119

1 INTRODUÇÃO

No dia 08 de junho de 1882, em uma das áreas metropolitanas mais populosas do planeta, a iluminação a partir da eletricidade foi exposta ao mundo de forma chamativa, segundo Jonnes (2003). Numa época em que combinar velas e lamparinas era a única forma viável de iluminar ambientes, num local com diversos milionários a procura de novos investimentos, surgiu a primeira instalação elétrica residencial bem-sucedida de Nova Iorque, a fim de iluminar a mansão de John Pierpont Morgan com 250 lâmpadas incandescentes.

Tal evento definitivamente mudou a forma como o mundo via e passaria a consumir a energia elétrica. Em menos de um século e meio, passou-se a gerar energia elétrica para mais de 5 bilhões de pessoas, mudando completamente a forma como vive a humanidade. Os geradores síncronos são as máquinas que possibilitaram essa mudança, máquinas capazes de transformar energia mecânica em energia elétrica. A sociedade é totalmente dependente delas hoje em dia.

Paradas imprevistas destas máquinas, especialmente em grandes usinas geradoras, podem deixar milhares de pessoas sem acesso à energia elétrica. Portanto, é evidente a importância de manter tais máquinas operantes e evitar qualquer tipo de falta ou mal funcionamento.

Existem estudos que buscam identificar relação entre defeitos em máquinas síncronas e características observadas no campo magnético gerado por elas. Tais campos seriam observados na parte de fora das máquinas, onde poderiam ser medidos com facilidade e com ela ainda operante. O conhecimento aprofundado dessa relação pode ser muito benéfico, pois ajudaria na identificação de máquinas defeituosas antes mesmo destas exibirem algum problema grave ou pararem completamente. Isso tornaria a manutenção destas máqui-

nas preventiva, ao invés de corretiva.

Neste contexto, na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) há um sistema para estudar e desenvolver metodologias de detecção de faltas, ainda em seu início, em máquina síncrona. Para tais estudos, é necessário um sistema de imposição de faltas controladas na máquina em questão.

1.1 MOTIVAÇÃO

A ideia da execução desse trabalho teve origens acadêmicas e didáticas. A bancada e os equipamentos que foram utilizados já são foco de estudos de outros pesquisadores da universidade. Um exemplo é a tese de doutorado de Mauricio Rigoni, publicada em 2014, onde foi desenvolvido um sistema de detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio do campo magnético externo à máquina.

Para os estudos de Rigoni, foram executados testes onde as faltas eram impostas manualmente, exigindo mais tempo, concentração e conhecimentos sobre os aspectos construtivos específicos da máquina em questão. Acredita-se que este TCC tornará a imposição de faltas neste sistema mais prática, ajudando nos futuros estudos da relação entre tais faltas e campos magnéticos externos de máquinas síncronas.

1.2 OBJETIVO

Este TCC consiste em impor faltas pré-determinadas na máquina, de forma automática, ao curto-circuitar parcialmente ou totalmente elementos internos da máquina, como bobinas no rotor, bobinas no estator e lâminas do núcleo. Tais curtos-circuitos são facilmente aplicados, pois a máquina possui uma placa especial de bornes, por onde são

feitas as conexões diretas com seus elementos internos. A fim de não danificar a máquina, também é necessário implementar um método de monitoramento das correntes de cada curto-circuito. As imposições de faltas são feitas de forma automática, cabendo ao usuário do sistema apenas selecionar uma ou mais faltas, por meio de uma interface digital, e aplicar o comando de executar.

Acredita-se que esta automação torna o processo de imposição de faltas mais seguro, prático e eficiente. A segurança está ligada ao fato de que o sistema automático não permite a execução de chaveamentos que podem danificar a máquina, além de existir monitoramento de correntes elétricas de curtos-circuitos, para gerar avisos ou desativação dos curtos. A praticidade encontra-se na rapidez e facilidade de impor faltas a qualquer momento, sem exigir frequente verificação de conexões elétricas ou chaveamentos. Por fim, o sistema pode ser eficiente tanto em espaço, por fazer uso de componentes dimensionados corretamente, quanto em operação, por executar chaveamentos de forma rápida e sincronizada.

Assim, o objetivo deste TCC foi projetar e desenvolver um sistema de controle da imposição de faltas em uma bancada de ensaios da UFSC.

2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Este capítulo tem por objetivo revisar os principais tópicos abordados neste trabalho, introduzindo conceitos que permitiram a execução da implementação do sistema.

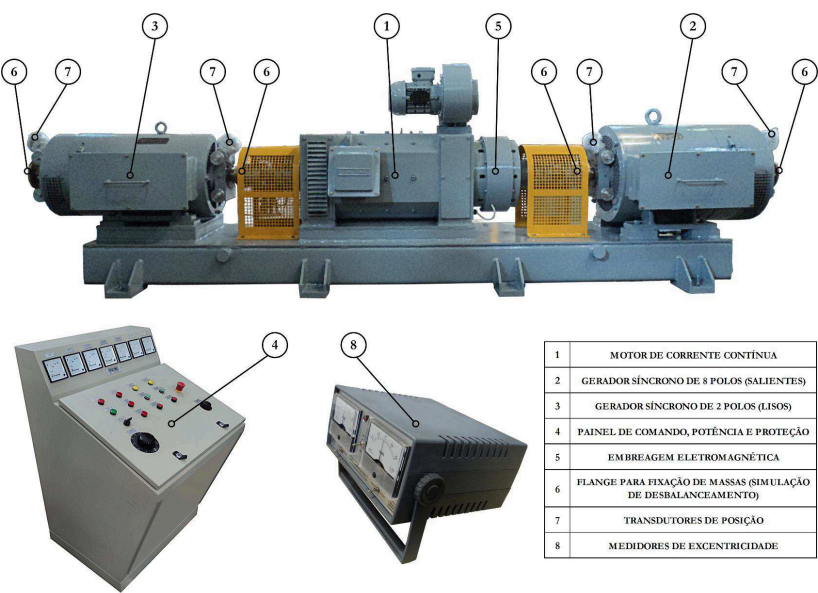
2.1 EQUIPAMENTOS USADOS

A UFSC possui uma bancada de simulação de defeitos em geradores síncronos, encomendada e construída especificamente para este objetivo. Tal bancada permite a imposição de diversos tipos de faltas nas máquinas, envolvendo tanto características mecânicas quanto elétricas. A construção do sistema foi executada pela empresa Equacional Elétrica e Mecânica Ltda.

A bancada se encontra no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos (LABMAQ) e é composta por 3 máquinas fixadas sobre uma base comum: 1 motor de corrente contínua, 1 gerador síncrono de 8 polos salientes e 1 gerador síncrono de 2 polos lisos. Acompanhando as máquinas, existem os seguintes equipamentos auxiliares: 1 embreagem eletromagnética para acoplamento do gerador de 8 polos ao motor de corrente contínua, 2 medidores de excentricidade, 4 transdutores de posição dos mancais para os geradores e 1 painel de comando, potência, proteção e sinalização para todo o conjunto. Os equipamentos mencionados estão representados na figura 1.

A bancada foi entregue à universidade com todos os componentes já conectados e funcionando corretamente, como encomendado. Porém, o painel de comando serve apenas para operar as máquinas. As faltas a serem impostas nas máquinas para fins de estudos precisam ser executadas ma-

Figura 1 – Bancada de simulação de defeitos em máquinas síncronas.



Fonte: Equacional, 2014.

nualmente ou por outro sistema.

De acordo com o Manual Geral de Instruções da bancada, fornecido pela Equacional (2014), as características especiais do sistema que permitem imposições de faltas nos geradores são:

[...] TAPs nos enrolamentos estatóricos e rotóricos, bobinas exploratrizes nos estatores, enrolamento amortecedor com fechamento externo, sistema de simulação de curto-circuito entre lâminas do núcleo, flanges nas pontas de eixo que possibilitam a fixação de massas para simulação de desbalanceamento e tampas especiais

com ajustes para introdução de excentricidade. (p. 3).

Este trabalho foca apenas nas faltas relativas aos TAPs dos enrolamentos estatóricos e rotóricos e à simulação de curto-circuito entre lâminas do núcleo, especificamente para o gerador síncrono de 8 polos. Tais faltas, até antes da execução deste trabalho, eram impostas de forma manual por meio de chaves que podem ser acionadas, em qualquer ordem e número, executando os curtos-circuitos necessários para simular faltas específicas. A figura 2 mostra o sistema de imposição de faltas acionado de maneira manual, que foi substituído por um sistema automatizado.

Figura 2 – Conexões e chaves do modo manual de imposição de faltas.



Fonte: Do autor

2.2 FALTAS A SEREM IMPOSTAS NA MÁQUINA SÍNCRONA

A bancada de simulação de defeitos em geradores síncronos usada neste trabalho teve seu projeto e construção

justificados a partir de resultados obtidos em estudos publicados por Mauricio Rigoni em 2014. Rigoni trabalhou no desenvolvimento de um sistema de detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos através da análise do espectro de frequências do fluxo magnético externo à máquina.

Seus resultados iniciais provêm de experimentos onde não era possível ter controle das faltas a serem analisadas. Seu primeiro experimento para medição de campo magnético externo a uma máquina foi realizado numa máquina do LABMAQ, máquina didática que estava operando precariamente, por gerar vibrações e ruídos sonoros. O segundo experimento foi realizado em um gerador síncrono hidráulico de grande porte, em funcionamento em uma usina hidrelétrica. Os resultados de Rigoni comprovaram que seus equipamentos e metodologias aplicados eram eficazes, gerando medições adequadas às aplicações, e permitiram dar continuidade à sua pesquisa com a construção da bancada de simulações de defeitos.

Ao estudar quais as componentes de frequência mais efetivas para análise e detecção de faltas em máquinas síncronas, Rigoni cita ainda alguns trabalhos onde testes importantes consistiam em aplicar curtos-circuitos parciais em bobinas dos enrolamentos rotóricos e estatóricos. Tendo em vista a praticidade e a facilidade de aplicar chaveamentos, e considerando que automatizar o modo de imposição apenas destas faltas já teria grande importância, o foco deste trabalho será apenas nas faltas impostas através de chaveamentos.

Devido às características construtivas da máquina usada neste TCC, algumas faltas a serem impostas exigem interações mecânicas, sendo estas: simulação de rotor com excentricidade, desbalanceamento mecânico e abertura do circuito de gaiola de amortecimento. As outras faltas dependem apenas de conexões entre os bornes da máquina. Por isso podem ser impostas por meio de acionamentos de conjuntos de cha-

ves. Conforme o manual da máquina (Equacional, 2014), as faltas aplicáveis a partir de chaveamentos são:

- Chaveamentos no enrolamento de campo (ou rotórico): através de diferentes conexões em bornes da máquina, é possível alterar o número de espiras de um dos polos do enrolamento do rotor, conforme a figura 3. As possibilidades são curto-circuitar e/ou simular perda de 20 %, 50 % ou 100 % das espiras de 1 polo;
- Chaveamentos no enrolamento de armadura (ou estático): da mesma forma do item anterior, é possível alterar o número de espiras de um dos polos de cada enrolamento do estator, ou seja, de cada uma das três fases, como mostrado na figura 4. As possibilidades são curto-circuitar e/ou simular perda de 16,7 %, 50 % ou 100 % das espiras de um polo de cada fase;
- Curto-circuito entre lâminas do núcleo: dois bornes permitem simular um curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator, conforme o esquemático da figura 5.

Figura 3 – Enrolamento de campo da máquina síncrona de 8 polos.

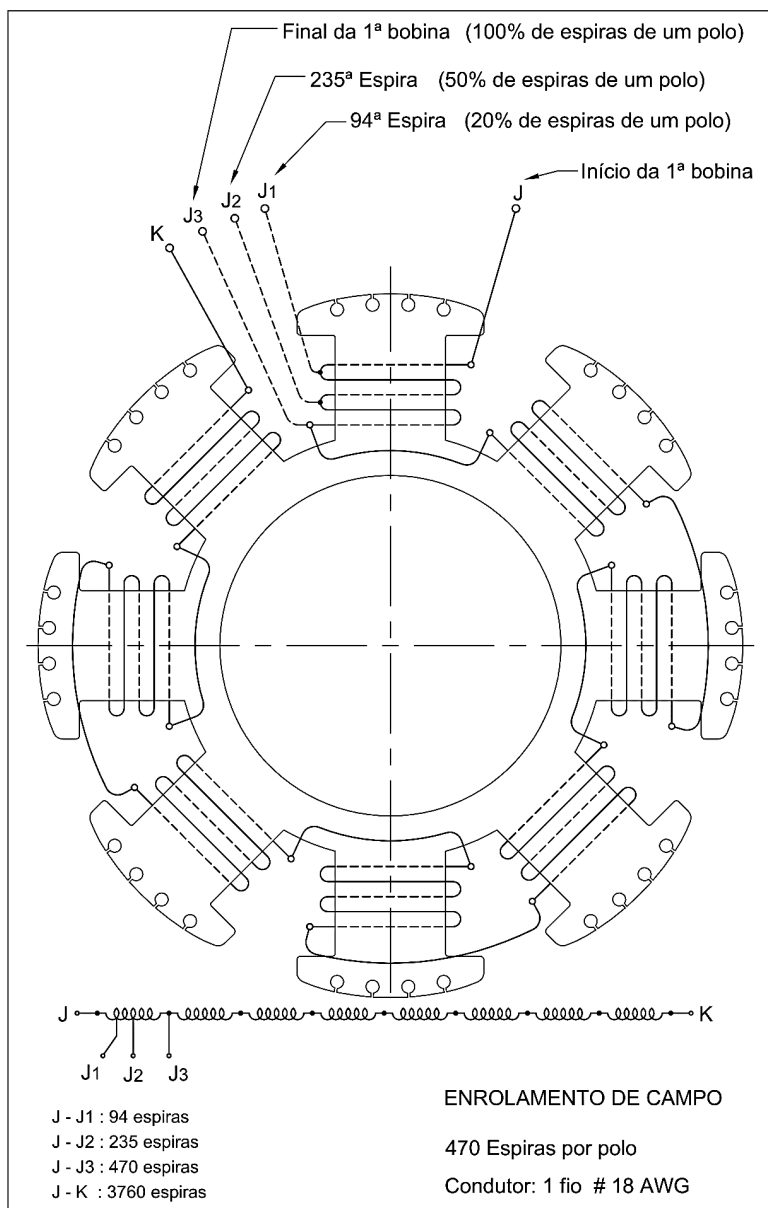
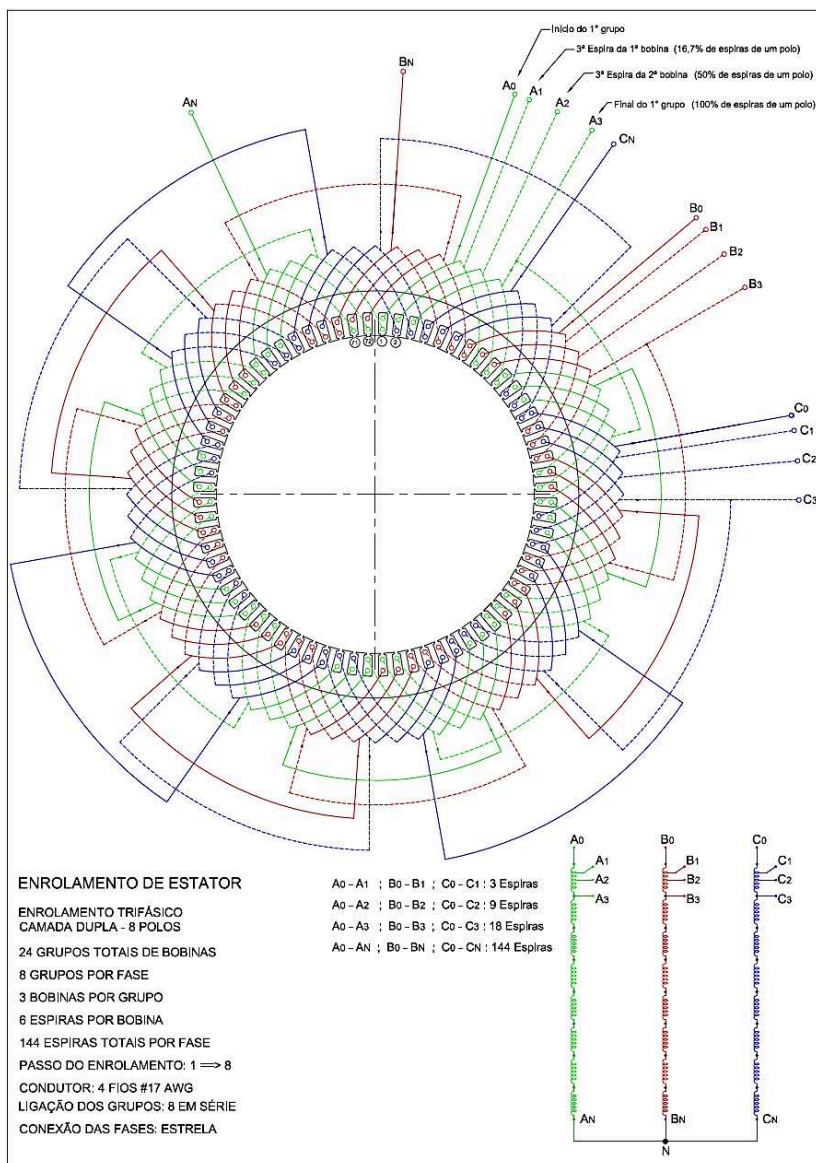
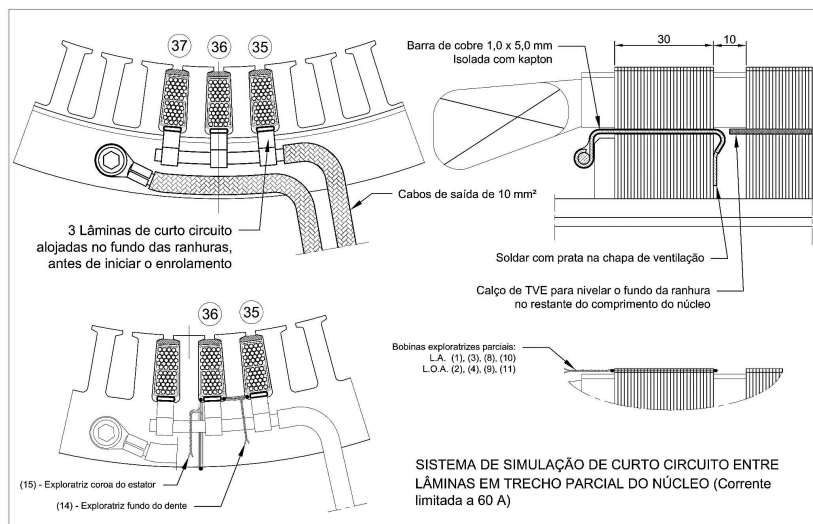


Figura 4 – Enrolamento de armadura da máquina síncrona de 8 polos.



Fonte: Equacional, 2014.

Figura 5 – Esquemático da simulação de curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator.



Fonte: Equacional, 2014.

2.3 MONITORAMENTO DE CORRENTES ELÉTRICAS

O sistema desenvolvido neste trabalho tem por principais objetivos tornar o processo de imposição de faltas automático e seguro. Para tal, é necessário que o sistema tenha meios de interpretar as correntes elétricas que estarão circulando nos pontos de curto-circuito da máquina, isto é, nos curtos-circuitos a serem criados. Desta forma, o sistema pode fazer (ou desfazer) chaveamentos específicos, de forma autônoma, para evitar danos na máquina quando esta operar com correntes nos curtos-circuitos muito elevadas (acima dos valores nominais).

Dentre os três grupos de chaveamentos a serem feitos, apenas os chaveamentos nos enrolamentos estatóricos pos-

suirão monitoramento de corrente, pois além de permitir retirada de espiras de um polo, serão impostos curtos-circuitos de espiras. O curto-circuito entre lâminas do núcleo será protegido por um fusível. Chaveamentos no enrolamento rotórico não permitirão imposição de curtos-circuitos, apenas permitirão retirada de espiras, diminuindo o número de espiras ativas de um polo.

Serão monitoradas as correntes de fase da máquina e as correntes de cada curto-circuito aplicado em cada fase. Por fase, é possível impor até 3 curtos-circuitos. Portanto, existem 4 correntes em cada fase a serem monitoradas, totalizando 12 correntes, por se tratar de uma máquina trifásica. Esta quantidade é relativamente alta, dependendo do sistema de medição a ser usado, pois existe espaço físico limitado onde serão colocados os medidores. Além disso, o custo também é uma preocupação.

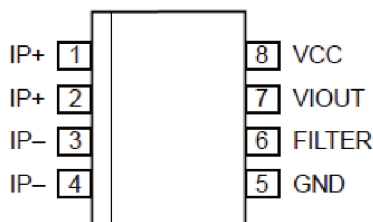
Foram pesquisadas algumas formas diferentes de executar medições de correntes elétricas, como os métodos citados nos trabalhos acadêmicos de SANTOS (2016) e TEIXEIRA (2009). Neste trabalho serão aplicados dois métodos diferentes devido às características do projeto, sendo um método para as correntes de fase e outro método para as correntes de curtos-circuitos.

2.3.1 Sensor comercial

Para as três correntes de fase, optou-se por uma medição confiável ao usuário, tendo um monitoramento preciso, conforme a carga que é exigida da máquina é variada. Desta forma, decidiu-se aplicar um método semelhante ao método usado com sucesso por Teixeira (2009, p. 22), que utiliza um componente comercial preciso, de Efeito Hall, o circuito integrado ACS712.

Segundo Halliday, Resnick e Walker (2014, p. 811), o Efeito Hall deve-se a elétrons de condução em um fio, ou placa de cobre, que podem ser defletidos por um campo magnético. Assim, sobre esta mesma placa, quando existir uma corrente elétrica fluindo em uma direção específica e um campo magnético perpendicular conhecido, um lado da placa terá maior concentração de cargas negativas do que o outro lado. Isso criará uma diferença de potencial, proporcional à corrente, que pode ser medida.

Figura 6 – Diagrama de pinos do CI ACS712.



Fonte: Allegro Microsystems, 2017.

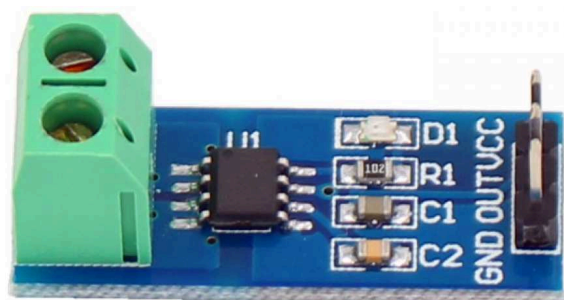
O diagrama de pinos do ACS712, conforme a folha de dados fornecida pelo fabricante Allegro, está representado na figura 6. Segue a descrição de cada pino do componente:

- IP+: Terminais para a corrente a ser medida (fundidos internamente);
- IP-: Terminais para a corrente a ser medida (fundidos internamente);
- GND: Terminal do sinal de terra;
- FILTER: Terminal para capacitor externo, para definir largura de banda do filtro;

- VIOUT: Saída do sinal analógico;
- VCC: Terminal de fonte de alimentação do dispositivo.

O ACS712 pode ser obtido juntamente com um circuito que trata o sinal de saída do CI, como pode ser observado na figura 7. Assim, já é possível efetuar a conexão direta entre este circuito e o microcontrolador.

Figura 7 – Medidor de corrente ACS712 aplicado em um circuito.



Fonte: Probots, 2017.

2.3.2 Sensor produzido

Para as nove medições das correntes de curto-circuito foi escolhido um método que ocupasse um espaço reduzido no circuito e que fosse mais barato de produzir, mesmo que exigisse mais tempo e dedicação. Este método não precisaria fornecer alta precisão, pois serviria apenas para detectar quando uma corrente elétrica for maior do que uma faixa de segurança, não importando o valor exato. Assim, empregou-se um método de medição onde um dos componentes consiste num sensor de indução, dispositivo que converte um campo magnético variante em um sinal elétrico, como explica Santos (2016, p. 33).

Os princípios físicos explorados para esta situação e para a construção de um dispositivo que pudesse ser usado para medir uma corrente elétrica alternada foram Lei de Biot-Savart e Lei de Indução de Faraday.

Observações muito antigas da física já sugeriam alguma relação entre partículas elétricas carregadas, em movimento, e campos magnéticos. Porém, os físicos Jean-Baptiste Biot e Félix Savart analisaram tal fenômeno e formalizaram, a partir observações experimentais, a Lei de Biot-Savart. Segundo Halliday, Resnick e Walker (2009, p. 220), esta lei confirma que uma corrente elétrica produz um campo magnético e ainda fornece uma equação vetorial que expressa a relação matemática entre tais grandezas. Esta é a primeira premissa para o funcionamento do sensor de corrente deste trabalho. Como o campo magnético depende diretamente da corrente elétrica, se houver uma corrente elétrica alternada, o campo magnético gerado por esta também irá variar de forma alternada.

A segunda premissa baseia-se na Lei de Indução de Faraday que, também conforme Halliday, Resnick e Walker (2009, p. 249), afirma: "...uma força eletromotriz e uma corrente podem ser induzidas em uma espira fazendo variar a quantidade de campo magnético que atravessa a espira. ”.

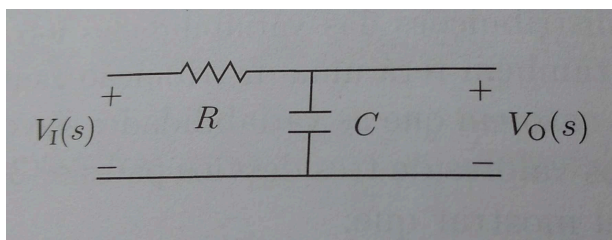
Partindo destas leis, criou-se um dispositivo que consiste basicamente de uma bobina com núcleo de ar. Junto da bobina, foi acoplado o condutor por onde passará a corrente elétrica a ser medida. Já que esta corrente é alternada, um campo magnético variante será gerado. A variação do campo magnético será captada pela bobina. Por fim, a tensão induzida na bobina é tratada por um circuito analógico. Mais detalhes do desenvolvimento e uso deste sensor de corrente serão vistos nos capítulos 4 e 5.

2.4 CIRCUITOS

A fim de executar os chaveamentos necessários e tratar os sinais dos sensores de correntes produzidos, alguns circuitos precisaram ser desenvolvidos. Também foi necessário implementar uma Interface Homem-Máquina (IHM), uma tela com botões onde o usuário pode dar comandos ao sistema e visualizar informações. Todas as informações e comandos são tratados e executados por um microcontrolador, a partir de lógicas de programação desenvolvidas especificamente para este trabalho.

O circuito mais preciso do projeto tem a função de tratar o sinal vindo do medidor de corrente produzido. A função de tal circuito é filtrar e amplificar o sinal de tensão proveniente do sensor de indução. Portanto, foram revisados e pesquisados conceitos de circuitos elétricos, como funcionamento e aplicação de filtros passa-baixa e amplificadores operacionais. De acordo com Noceti Filho (2010, p. 46), um simples filtro passa-baixa de 1ª ordem pode ser implementado com um resistor R e um capacitor C , conforme a figura a 8.

Figura 8 – Filtro passa-baixa de 1ª ordem.



Fonte: Noceti Filho, 1998.

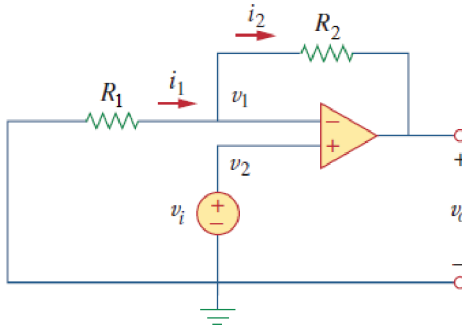
O filtro mostrado na figura 8 possui uma frequência de

corde f_c tal que, dentre quaisquer sinais aplicados na entrada do filtro (V_I), apenas sinais abaixo dessa frequência serão totalmente disponibilizados na saída do filtro (V_O). Ou seja, este filtro elimina sinais com frequências acima da frequência de corte, que pode ser calculada a partir de (2.1):

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.1)$$

Amplificadores operacionais podem ser aplicados em circuitos com inúmeras topologias diferentes. Neste trabalho foi essencial o uso deste dispositivo na topologia Amplificador Não-Inversor, como mostrado na figura 9.

Figura 9 – Circuito Amplificador Não-Inversor.



Fonte: Alexander e Sadiku, 2013.

Segundo Alexander e Sadiku (2013, p. 184), esta topologia da figura 9 fornece um ganho de tensão (relação entre sinal de saída v_o e sinal de entrada v_i) que é calculado por meio de (2.2). Portanto, para amplificar um sinal qualquer, com esta topologia, basta definir os valores dos resistores R_1 e R_2 .

$$\frac{v_o}{v_i} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2.2)$$

Finalmente, o circuito de chaveamento implementado consiste de diversos relés que são controlados pelo microcontrolador. Para o acionamento de cada relé foi usado um transistor de junção bipolar do tipo NPN, um dispositivo que pode ser usado como uma chave que é acionada por um sinal de baixa corrente. Os sinais de acionamento vem diretamente de portas digitais do microcontrolador.

Os circuitos foram projetados no programa Multisim, para simulações de funcionamento, e no programa Altium, para montar a disposição dos componentes de forma a caberem em placas de circuito impresso de tamanhos específicos. As placas foram fabricadas pela empresa Digicart.

2.5 MICROCONTROLADOR

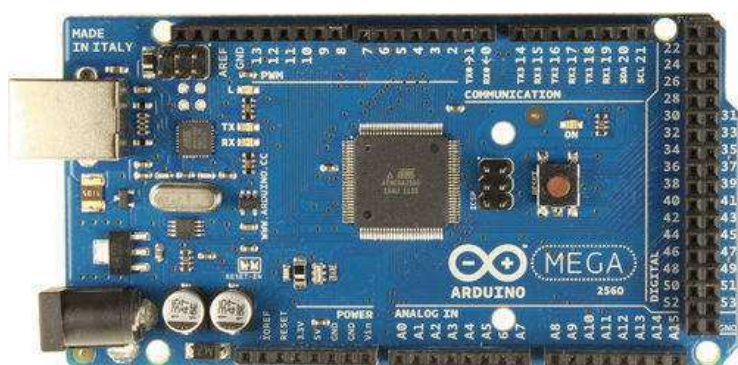
O microcontrolador encarregado de comandar todo o sistema é o *chip* ATmega1280, que já vem integrado na placa Arduino Mega. Arduino é uma plataforma de prototipagem e desenvolvimento para projetos em eletrônica, que disponibiliza todas as especificações do projeto de seu *hardware* e de seu *software*, segundo Monk (2017). Desta forma, a plataforma criou um ambiente claro e didático, com inúmeros exemplos e materiais disponíveis publicamente, que auxiliam seu uso.

A nível de comparação, pode-se dizer que um Arduino seria uma versão simplificada de um Controlador Lógico Programável (CLP), dispositivo usado na indústria para controlar máquinas e comandar ou monitorar processos industriais. Ambos possuem uma plataforma de programação (*software*),

onde lógicas de controle ou monitoramento podem ser criadas, e um *hardware* para enviar e receber sinais elétricos, que serve de meio de comunicação entre a lógica programada e a aplicação real (como acionar LEDs, válvulas, chaves e motores, por exemplo).

Dentre as diferentes placas disponíveis, foi escolhida a placa Arduino Mega, que pode ser observada na figura 10. Esta placa apresenta uma grande quantidade de portas digitais e analógicas, ideal para este projeto que acionará dezenas de relés e receberá sinal de doze medidores de corrente elétrica.

Figura 10 – Placa Arduino Mega.



Fonte: Robotpark, 2015.

A escolha de usar a plataforma Arduino se deve à facilidade de aprendizagem e da grande disponibilidade de material didático. Como o desenvolvimento completo de um sistema embarcado não foi o foco do trabalho, fazer o uso de uma plataforma pronta não foi visto como um problema. A flexibilidade da plataforma também foi um fator importante, como a possibilidade de reutilização do código aqui programado em outras placas. Assim, em caso de sucesso, boa parte do sistema aqui desenvolvido pode ser reaproveitado

em outros projetos semelhantes, como no desenvolvimento de um sistema de imposição de faltas para a outra máquina síncrona presente na bancada da máquina usada neste trabalho.

3 SISTEMA DE IMPOSIÇÃO DE FALTAS EM MÁQUINA SÍNCRONA

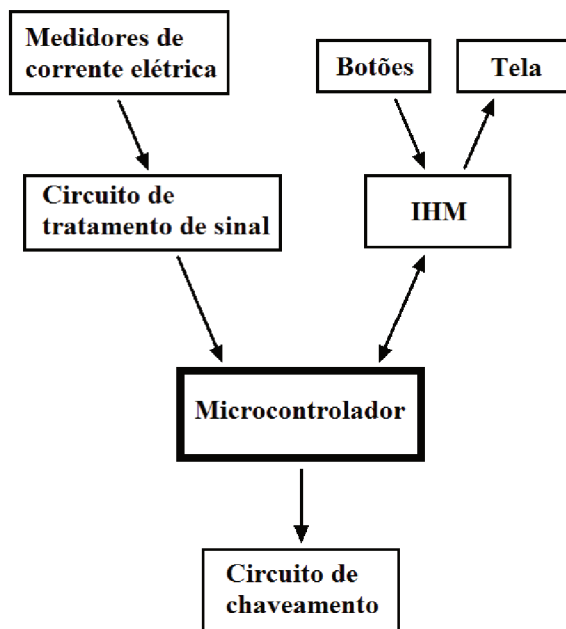
O sistema de imposição de faltas consiste de diversos elementos que interagem entre si. O microcontrolador é o elemento central, responsável por controlar o sistema por meio de pinos de entrada e saída, sendo que estes podem lidar tanto com sinais analógicos como digitais.

Os sinais nos pinos de entrada fornecem informações que são interpretadas por um algoritmo, uma sequência de tratamentos lógicos pré-programados no microcontrolador. A partir das entradas, o algoritmo gera uma série de informações, ou saídas, que impactam em comandos a serem executados pelos pinos de saída. No sistema aqui desenvolvido, as entradas são os estados de botões, usados pelo operador do sistema, e os valores medidos de correntes elétricas. As saídas são usadas para ativar e desativar relés e atualizar a tela da IHM. As interações entre os elementos do sistema são representadas pelo diagrama de blocos da figura 11. Neste diagrama, as flechas representam sinais elétricos e o sentido delas indica a função do sinal para cada elemento: entrada (apontando para o bloco) ou saída (apontando para fora do bloco).

Este capítulo faz uma análise de cada um dos elementos presentes na figura 11, indicando a forma como os sinais são utilizados e a forma como os elementos estão dispostos nos circuitos.

As placas de circuito impresso desenvolvidas para este trabalho podem ser divididas em duas partes: placas de potência e placas de controle. Essa divisão se deve à natureza dos sinais que percorrem tais placas. As placas de potência comportam circuitos onde circulam correntes e tensões elevadas, tensão nominal da máquina de 380 V e corrente máxima

Figura 11 – Diagrama de blocos do sistema de imposição de faltas em uma máquina síncrona.



Fonte: Do autor.

de 15,2 A. As placas de controle trabalham com tensões de 5 e 12 V e correntes baixas, na ordem de miliamperes.

3.1 PLACAS DE POTÊNCIA

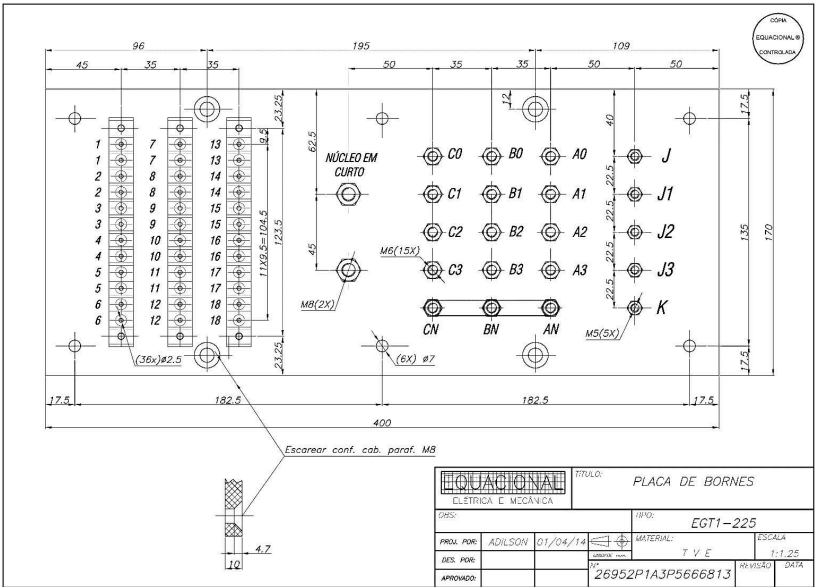
Existem duas placas de potência neste projeto, sendo uma montada acima da outra. Estas placas foram projetadas para ocupar um volume máximo específico, de forma que coubessem dentro da caixa de bornes da máquina. Assim, evita-se que campos magnéticos de grande magnitude, provenientes de correntes internas da máquina, se estabeleçam

por fora da máquina, já que a caixa de bornes se comporta como uma blindagem.

Dentro da caixa de bornes existe apenas uma placa de bornes e um espaço vazio de 400 mm de comprimento, 170 mm de largura e 100 mm de profundidade. Neste espaço deverão caber as placas de potência, com seus componentes, e os cabos que farão as conexões entre os bornes e as placas. Através da placa de bornes, representada na figura 12, podem ser feitas as conexões com os grupos de terminais já mencionados no capítulo anterior, relativos às figuras 3, 4 e 5. Nas placas de potência, encontram-se os medidores de corrente elétrica e o circuito de chaveamento.

Este circuito de chaveamento foi desenvolvido para acionar três grupos independentes de chaves que fazem conexões entre bornes (terminais) da máquina, sendo estes os grupos de bornes: ABC (terminais do enrolamento estatórico), JK (terminais do enrolamento rotórico) e Núcleo em Curto. O grupo ABC se refere às fases A, B e C da máquina, disponibilizando 5 terminais por fase. Serão usados apenas 4 terminais de cada fase, pois os terminais de neutro de cada fase já estão conectados.

Figura 12 – Placa de bornes da máquina.



Fonte: Equacional, 2014.

3.1.1 Grupo ABC

Esta máquina possui 8 polos, portanto cada fase possui 8 grupos de enrolamentos (conjuntos de espiras). Dos 8 polos, 7 possuem um número fixo de espiras (18 espiras por polo), enquanto um polo permite ter seu número de espiras alterado. Como pode ser observado na figura 4, quando a entrada da fase A estiver conectada no terminal A0, o primeiro polo terá o número máximo de espiras, simulando o funcionamento normal desta fase. Se a entrada for conectada no terminal A1, este polo passa a ter 3 espiras a menos. Com a conexão em A2, perdem-se 9 espiras do polo. Finalmente, com a conexão em A3 perdem-se 18 espiras, ou seja, o polo

inteiro, simulando que esta fase da máquina está com um polo inteiramente defeituoso.

Além de simular a perda, desconectando-se espiras de um polo, também é possível curto-circuitar as espiras. Por exemplo, é possível conectar a entrada da fase no terminal A1 e conectar os terminais A0 e A1. Desta forma, simula-se a perda de 3 espiras por existir um curto-circuito entre elas. Os curtos podem ser impostos entre quaisquer pinos adjacentes, ou seja, entre os terminais A0 e A1, entre os terminais A1 e A2 e entre os terminais A2 e A3.

Além de chavear a entrada de cada fase entre 4 terminais e permitir impor até 3 curtos-circuitos, foi necessário prover um chaveamento auxiliar para possibilitar o uso deste sistema com a máquina ligada e operando (não seria possível abrir chaves por onde circulassem correntes de fase com a máquina ligada sem danificá-las).

Como os enrolamentos da máquina são basicamente longos fios enrolados, tais enrolamentos possuem características indutivas. Conforme Alexander e Sadiku (2013, p. 228), a corrente elétrica que passa por um indutor não pode variar instantaneamente, pois isso implicaria no surgimento de um pulso de tensão. Tal comportamento pode ser compreendido através da fórmula que relaciona a tensão e a corrente em um indutor:

$$v = L \frac{d_i}{d_t} \quad (3.1)$$

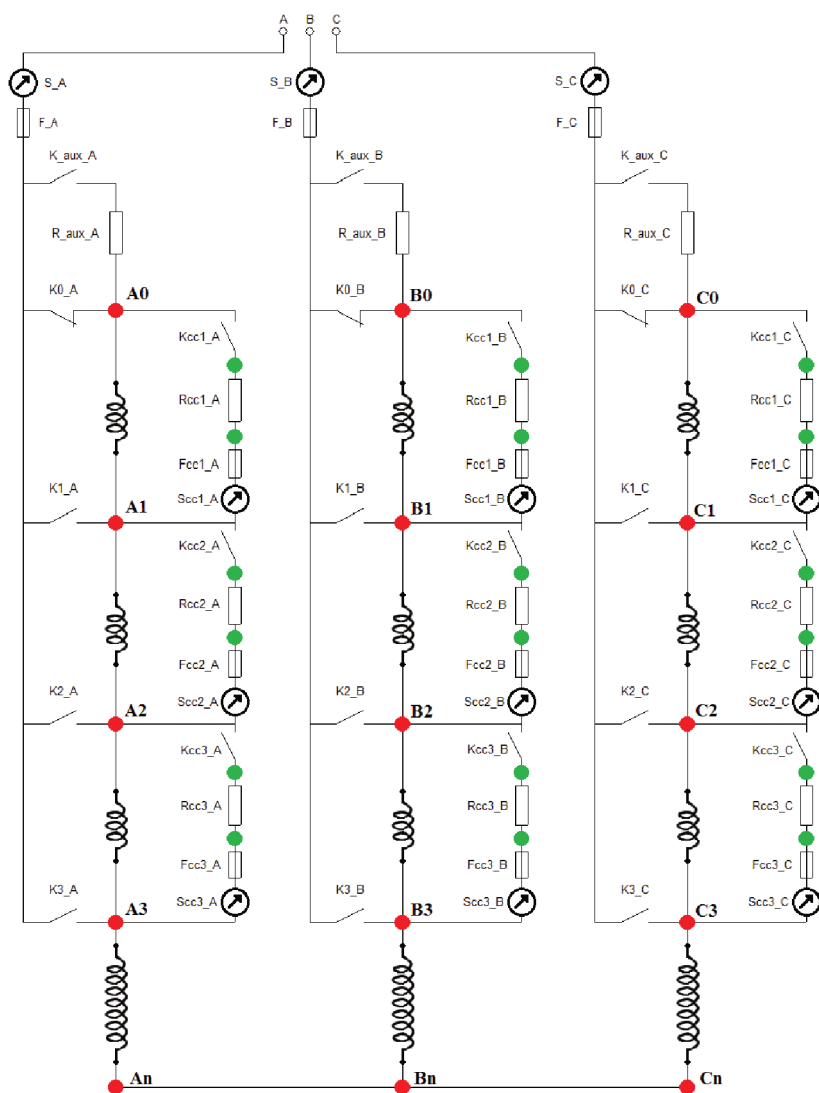
Esta fórmula indica que a tensão v criada entre os terminais de um indutor será proporcional à sua indutância L multiplicada pela variação da corrente i que por ele circula. Assim, se a corrente nos enrolamentos da máquina repentinamente deixasse de existir, ao abrir a chave por onde passa tal corrente, sobre os enrolamentos da máquina surgiria uma

tensão extremamente alta por um curto período de tempo, colocando em risco a integridade da chave por onde esta corrente circulava.

Aplicado em cada fase, o chaveamento auxiliar consiste em uma chave conectada entre o primeiro terminal (terminal A0 para a fase A, por exemplo) e a entrada da fase. Quando a chave auxiliar é fechada, a corrente da máquina pode circular por todas as espiras do polo em questão e fluir até a entrada da máquina. Neste momento, é possível abrir a chave que estava conectada em um dos quatro terminais da fase e ainda fechar uma outra chave. Assim, o chaveamento entre terminais é executado, sem danos ao sistema, e o chaveamento auxiliar pode ser desativado. Porém, enquanto a troca entre terminais é executada, existirá um curto entre tais terminais e o primeiro terminal. Para evitar danos, foi inserida uma resistência em série com a chave auxiliar, e a troca entre terminais é executada durante um tempo muito pequeno (algumas dezenas de milissegundos).

Para facilitar a interpretação do esquemático do grupo ABC, representado na figura 13, as conexões com os terminais do grupo ABC estão marcadas por pontos vermelhos e as conexões para adicionar resistência externa estão marcadas por pontos verdes. Para identificar os componentes no esquemático, a letra inicial de cada descrição indica o que é cada componente, onde foi usado: F para fusíveis, K para chave, R para resistência e S para sensor de corrente. As bobinas entre os terminais são representações das espiras da máquina e, como já visto anteriormente, o número de espiras entre cada terminal é diferente.

Figura 13 – Esquemático do circuito de chaveamento do grupo de terminais ABC.



Fonte: Do autor.

Considerando todas estas características necessárias, o sistema para o grupo ABC, por fase, consiste de: 7 contatos NA (normalmente aberto), 1 contato NF (normalmente fechado), 1 resistência auxiliar, 1 fusível e 1 sensor de corrente na entrada da fase e 1 fusível e 1 sensor de corrente em cada curto-circuito. Além disso, para cada curto-circuito a ser imposto entre os terminais, decidiu-se disponibilizar terminais para adição de uma resistência externa.

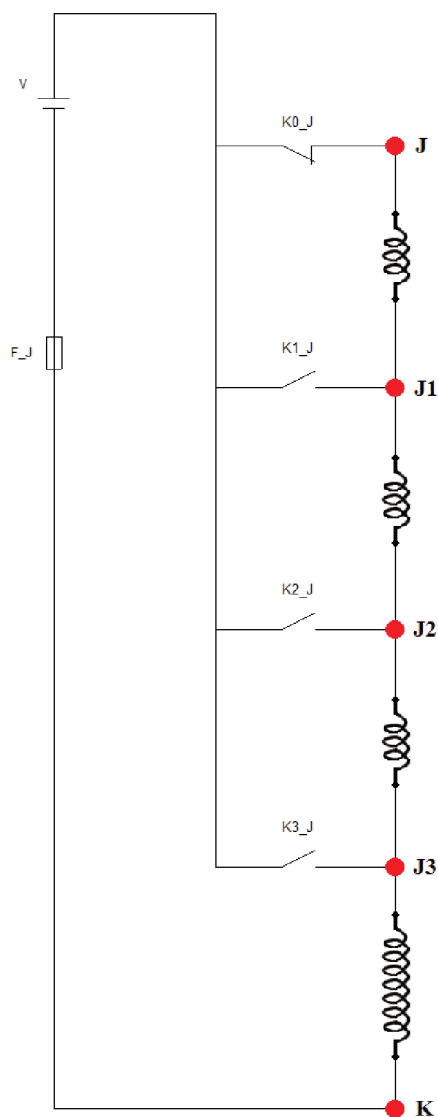
Dentre as chaves que levam à seleção de um dos quatro terminais de cada fase, apenas a primeira chave é um contato normalmente fechado. Desta forma, a máquina pode ser ligada e utilizada com o sistema de imposição de faltas desligado, comportando-se como se não houvesse faltas.

3.1.2 Grupo JK

O esquemático do circuito de chaveamento do grupo JK está representado na figura 14, onde as conexões com os terminais do grupo estão marcadas por pontos vermelhos. O circuito é composto apenas por 4 chaves e 1 fusível.

Este grupo de terminais JK de excitação da máquina tem um esquemático de chaveamento similar ao grupo anterior do estator. Por estes terminais é feita a alimentação do campo do rotor, com uma tensão contínua. Por conta desta característica do sinal, e por não ser o foco atual dos estudos relativos à máquina, decidiu-se que neste grupo não serão criados curtos-circuitos. Portanto, haverá apenas a possibilidade do chaveamento entre terminais que alteram o número de espiras de um polo.

Figura 14 – Esquemático do circuito de chaveamento do grupo de terminais JK.



Fonte: Do autor.

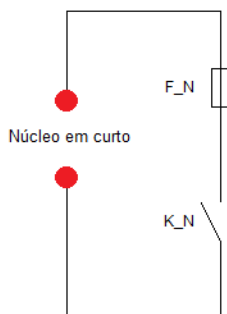
O enrolamento de campo desta máquina, assim como os enrolamentos do estator, possui oito polos. Neste enrolamento, cada polo é composto por 470 espiras. Da mesma forma que o grupo ABC, no grupo JK apenas o primeiro polo do enrolamento pode ter seu número de espiras alterado. De acordo com a figura 3, conectando-se a alimentação do enrolamento no terminal J, o primeiro polo é totalmente ativado. Conectado no terminal J1, perdem-se 94 espiras. Conectado no terminal J2, perdem-se 235 espiras e, conectado no terminal J3, perdem-se todas as 470 espiras do primeiro polo do enrolamento de campo.

Neste grupo não foi implementado nenhuma chave ou resistência auxiliar para fazer a troca entre os terminais, já que as correntes que circulam neste caso são muito menores (máximo de 3,5A). Para evitar a queima das chaves, o circuito do enrolamento de campo nunca é aberto, ou seja, sempre haverá uma chave conectando a alimentação até um dos quatro terminais. Assim, para chavear a alimentação de um terminal para o outro, primeiro conecta-se ao novo terminal para então desfazer a ligação do terminal anterior.

3.1.3 Grupo Núcleo em Curto

Para simular um curto-circuito de chapas do estator, há uma espira que envolve uma parte do núcleo, que pode ser fechada. Como pode ser observado na figura 12, este grupo apresenta apenas dois terminais, existindo apenas a possibilidade de aplicar ou desfazer um curto-circuito entre eles. Este circuito é composto por um fusível e uma chave e as conexões com os terminais do grupo estão marcadas por pontos vermelhos.

Figura 15 – Esquemático do circuito de chaveamento do grupo de terminais Núcleo em Curto.



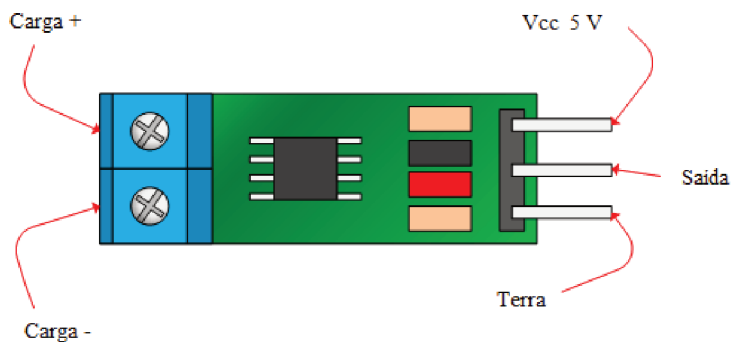
Fonte: Do autor.

3.1.4 Sensores de corrente elétrica

Foram implementados sensores de corrente apenas no circuito de chaveamento do grupo de bornes ABC. Observa-se na figura 13 que existem, por fase, 4 sensores. Para monitorar a corrente de fase usou-se o sensor comercial ACS712 e, para monitorar as correntes de curto-circuito, foram produzidos sensores.

Os terminais do sensor ACS712 são conectados conforme a figura 16. Nos conectores com parafusos (Carga + e Carga -) são acoplados os condutores por onde circula a corrente a ser medida. Como alimentação para funcionamento, este circuito necessita apenas de uma tensão contínua de 5 V.

Figura 16 – Conexões do sensor de corrente ACS712.



Fonte: Henrys, 2015.

Como o sistema desenvolvido neste trabalho é alimentado por uma fonte de 12 V, para gerar os 5 V de alimentação do sensor foi usado um regulador de tensão. O modelo escolhido foi o L7805, capaz de converter qualquer entrada contínua entre 8 e 20 V para uma tensão contínua de saída de 5 V. Foram adicionados capacitores de filtragem na entrada e na saída do regulador, conforme recomendado na ficha de dados do componente, para ajudar a estabilizar as tensões do circuito. Apesar de que o total de corrente elétrica fornecida para alimentar três sensores é muito pequeno (30 mA) em relação à corrente máxima fornecida (500 mA), por segurança, foi acoplado um dissipador de calor no regulador de tensão.

O pino de saída do sensor é conectado diretamente no microcontrolador, em uma porta analógica, devido às características do sinal. Este sensor fornece em sua saída uma tensão proporcional à corrente lida, seguindo uma relação linear de sensibilidade de 100 mV/A, sendo que a corrente máxima permitida de leitura é 20 A. O sinal de saída varia em torno da tensão de 2,5 V. Portanto, para interpretar o

valor da corrente medida, o microcontrolador precisará calcular a diferença entre a tensão de saída do sensor (em mV) e o valor de tensão de referência de 2500 mV. Por fim, divide-se este valor por 100 mV, resultando em um valor em ampere. A saída do sensor varia no máximo entre 0,5 e 4,5 V (se a corrente medida for igual a 20 A), valor seguro para esta aplicação, já que o microcontrolador usado suporta valores entre 0 e 5 V em seus pinos.

Por exemplo, com o sensor ACS712 medindo uma corrente de 0 A, sua saída fornecerá uma tensão de 2,5 V. Quando este sensor estiver medindo uma corrente de 5 A, será gerada uma saída de 3 V, ou 3000 mV, já que cada ampere representa uma soma de 100 mV ao sinal base de saída de 2500 mV.

Quanto aos sensores produzidos, buscou-se implementar a mesma forma de comportamento do sensor ACS712. Desta forma, criou-se um padrão de medidores usados no projeto, a fim de utilizar o mesmo código escrito no microcontrolador para interpretar qualquer sensor. A única diferença entre os sensores, relativa à interpretação de seus sinais, foi a sensibilidade.

Enquanto todos os sensores ACS712 possuem uma sensibilidade de 100 mV/A, cada um dos 9 sensores produzidos demonstrou uma sensibilidade diferente, variando entre 140 e 161 mV/A. Essa diferença não é um problema no código que interpreta o sinal, pois isso implica apenas em declarar um parâmetro de sensibilidade diferente para cada sensor lido. Maiores detalhes sobre os sensores produzidos serão expostos nos capítulos 4 e 5 deste trabalho.

3.1.5 Circuito final

Com todos os elementos definidos e projetados, foi possível criar os esquemáticos das placas de circuito impresso a serem produzidas. Além de utilizar de todas as informações fornecidas desde o início da sessão 3.1 até este ponto, foi necessário saber quais sinais seriam comunicados até as placas de controle, que serão explicadas ao longo da sessão 3.2.

As placas de potência possuem as seguintes funções: servir de suporte mecânico para os componentes, comportar o circuito que se estende das placas de controle (para acionamento das chaves e comunicação com sensores) e comportar o circuito de potência. Entretanto, as conexões do circuito de potência não foram implementadas por meio de trilhas de condutores na placa. Devido as altas correntes, as conexões do circuito de potência foram feitas com fios soldados na parte de baixo das placas. Por este motivo, os componentes onde os fios seriam soldados possuem *pads* mais largos do que o normal.

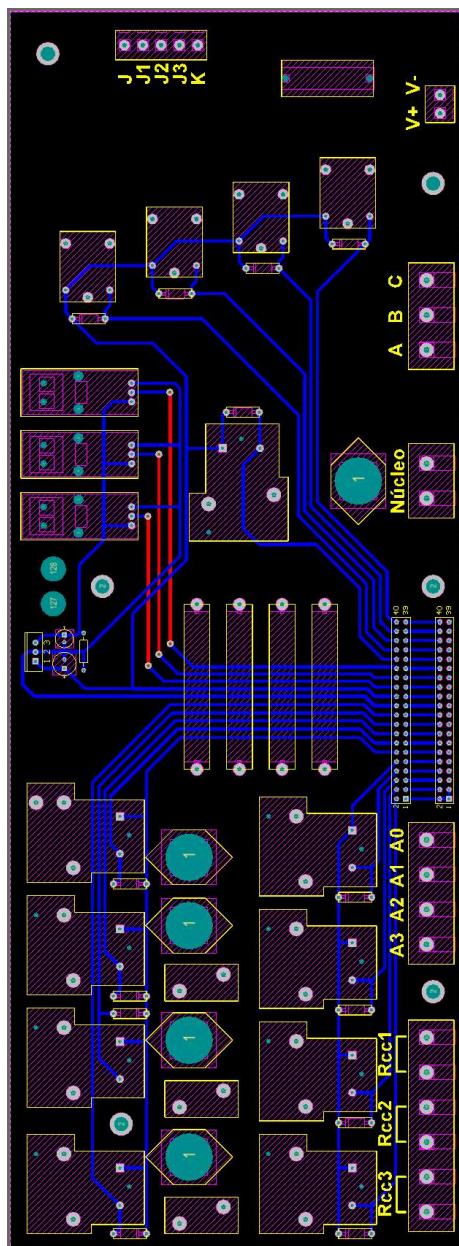
Foram elaboradas duas placas de potência com furações alinhadas, para que fossem presas uma na outra e presas a uma base, por meio de espaçadores metálicos parafusáveis com rosca M3. A placa 1, montada acima da placa 2, comporta os grupos JK e Núcleo em Curto e a fase A do grupo ABC. A placa 2 comporta as fases B e C do grupo ABC.

As chaves do grupo ABC consistem de relés que suportam correntes de até 20 A. As chaves do grupo JK consistem de relés que suportam correntes de até 10 A. Os cilindros alaranjados dispostos na horizontal representam as bobinas dos sensores produzidos. Os elementos com uma base hexagonal preta e com cilindros vermelhos dispostos na vertical representam porta-fusíveis rosqueáveis.

A comunicação entre placas de potência e placas de controle se dá por meio de um cabo *flat*, de aproximadamente

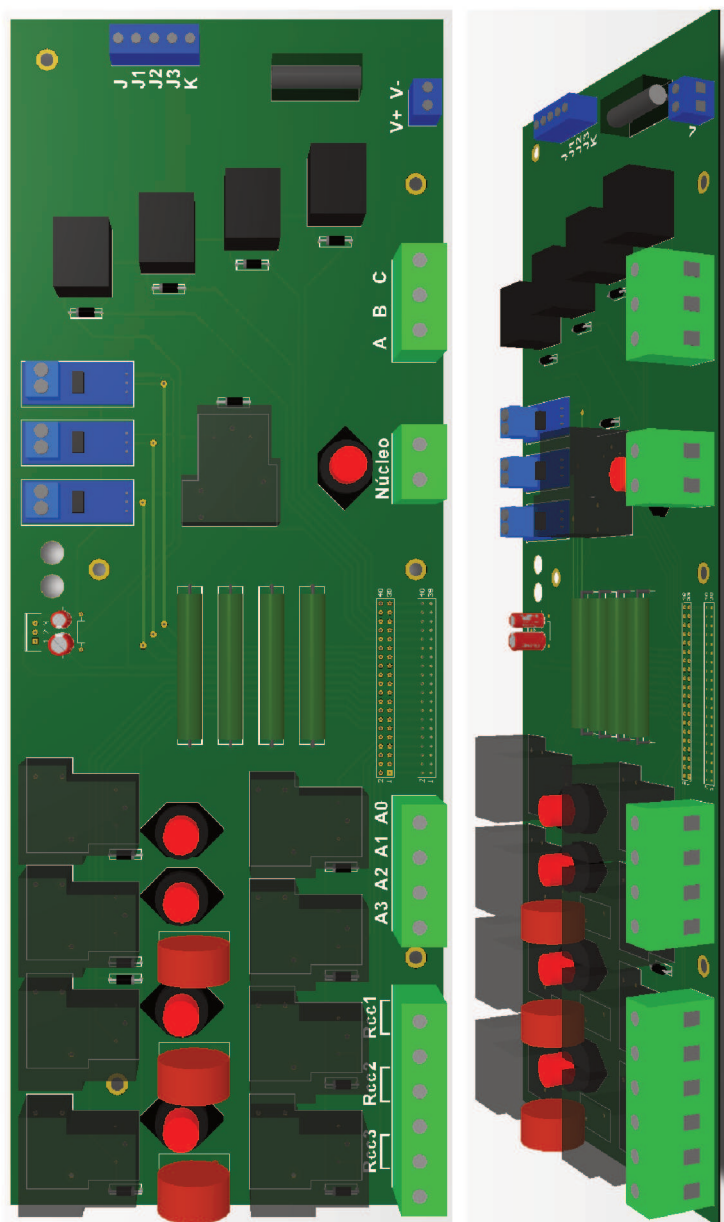
1 metro e meio, de 40 vias. Este cabo é conectado na placa de potência 1 e na placa de controle 1. A passagem de sinais entre as placas de potência é feita por outro cabo *flat*, de aproximadamente 10 centímetros. As correntes das fases B e C, provenientes da placa 2, são transmitidas para a placa 1 cada uma por um fio, através de conectores posicionados na parte de trás da placa. As figuras 17, 18, 19 e 20 representam as placas de potência.

Figura 17 – Conexões da placa de potência 1.



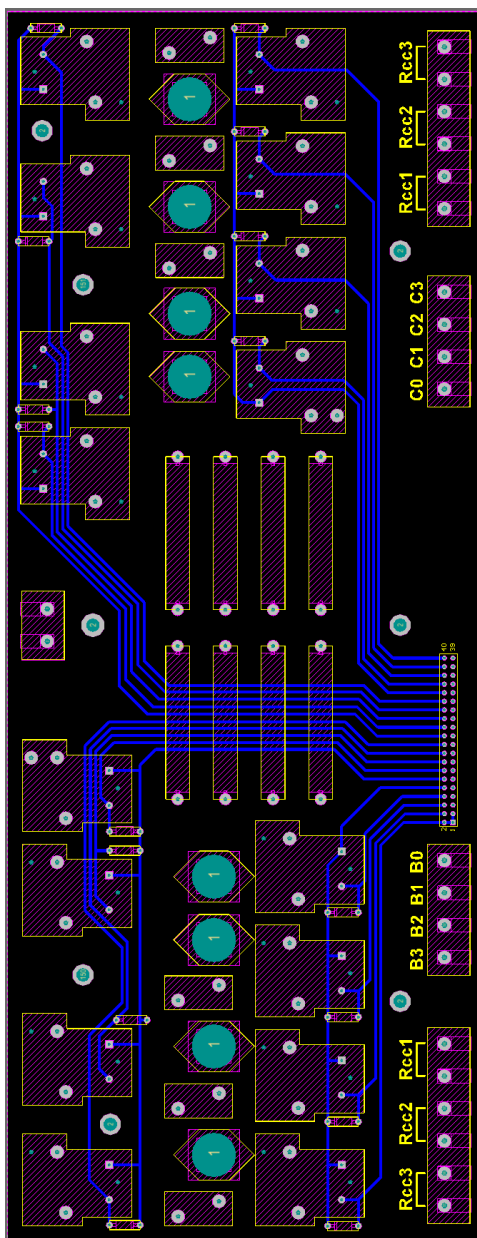
Fonte: Do autor.

Figura 18 – Vistas 3D de cima e de frente da placa de potência 1.



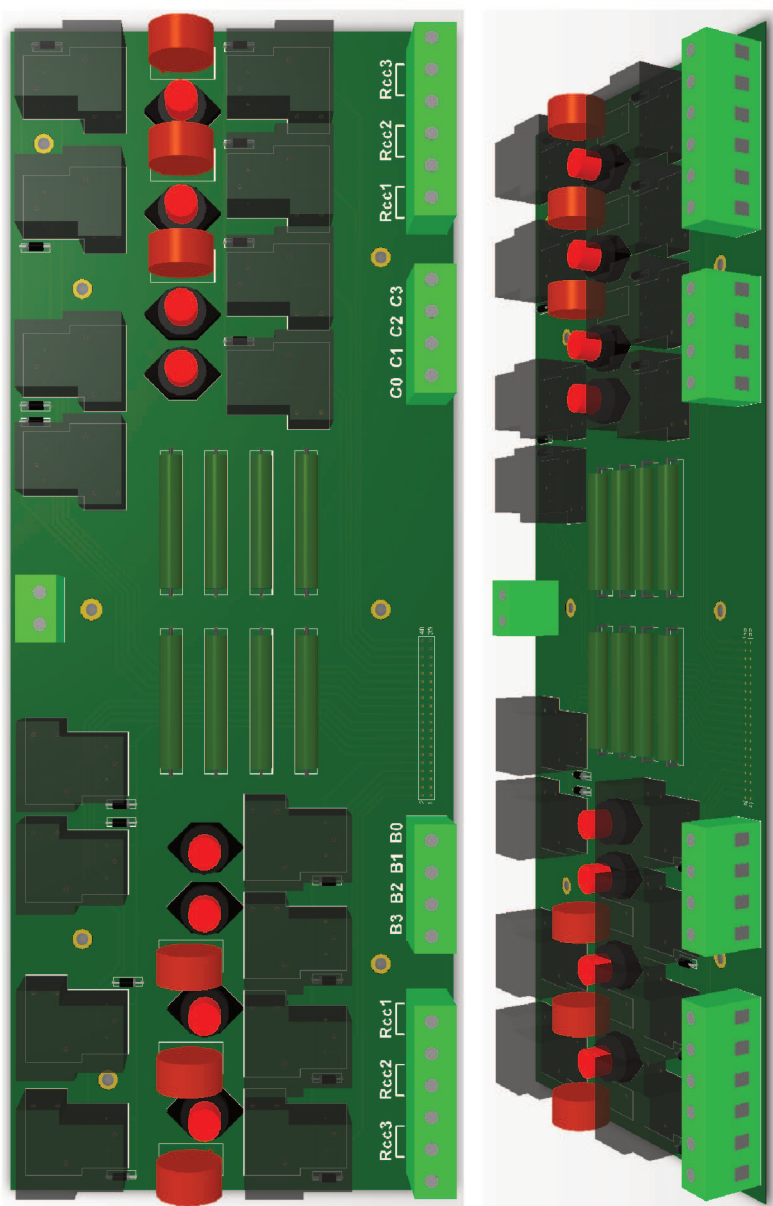
Fonte: Do autor.

Figura 19 – Conexões da placa de potência 2.



Fonte: Do autor.

Figura 20 – Vistas 3D de cima e de frente da placa de potência 2.



Fonte: Do autor.

3.2 PLACAS DE CONTROLE

O controle dos circuitos de potência é realizado por meio de circuitos eletrônicos em placas de controle. Estas placas são responsáveis por comportar o microcontrolador, tratar seus sinais de entradas e saídas, e possibilitar a interação de usuários com o sistema, por meio de uma IHM. Para estas placas não houve especificações de dimensões, porém se buscou mantê-las compactas e de uso prático. Componentes sensíveis, como Circuitos Integrados (CIs), são apenas encaixados em soquetes ao invés de soldados na placa e pinos de comunicação e botões são de fácil acesso, não havendo obstrução de componentes essenciais entre as placas.

Existem duas placas de controle que, semelhante às placas de potência, possuem furações alinhadas para fixação de uma sobre a outra e sobre uma base. A comunicação entre elas se dá por um cabo *flat* de 11 vias, com cerca de 10 cm de comprimento. Decidiu-se implementar a IHM em uma placa separada, montada acima do microcontrolador, para que o usuário não tocasse em componentes dos circuitos da placa principal de controle, bem como para existir uma barreira física protegendo o microcontrolador.

3.2.1 Microcontrolador

Principal placa de todo o sistema, a placa 1 de controle comporta o microcontrolador e possui três funções: tratar sinais de entradas e saídas, fornecer a alimentação do sistema e executar os tratamentos lógicos necessários a partir da programação.

3.2.1.1 Entradas e saídas

A maior parte das saídas utilizadas são referentes ao chaveamento de relés. Estes chaveamentos são executados por meio de saídas digitais, ou seja, saídas que possuem apenas dois estados possíveis: ativada ou desativada. Cada saída digital é responsável por acionar 1 transistor que, por consequência, acionará 1 relé, sendo que existe um total de 29 relés no sistema.

Para reduzir o número de componentes na montagem e utilizar menos espaço na placa, ao invés de montar um circuito repetitivo com resistores, transistores e diodos, foi usado o circuito integrado ULN2803A. Este dispositivo, comumente usado em projetos de eletrônica, consiste em um *chip* com oito transistores NPN do tipo Darlington. O transistor Darlington é um dispositivo composto por dois transistores de junção bipolar, onde a base do primeiro transistor é conectada no emissor do segundo. Segundo Hodges (1999), o ganho do transistor de Darlington é igual à multiplicação dos ganhos dos dois transistores que o formam. Essa característica de alto ganho permite controlar cargas de alta corrente aplicando correntes muito baixas, como é o caso de correntes fornecidas por microcontroladores, na base do transistor.

Cada transistor Darlington do ULN2803A suporta chavear uma corrente de até 500 mA, além de possuir um resistor no terminal de base, para ser diretamente operado por sinais entre 3,3 e 5 V, e um diodo de roda livre, importante para a proteção do componente quando usado com cargas indutivas. Inclusive, a ficha de dados fornecida pelo fabricante menciona que este CI é ideal para aplicações com cargas indutivas como relés. O projeto fez uso de 25 relés do modelo HT2150(T90) e 4 relés do modelo CTK 1C, sendo que estes consomem 75 e 30 mA, respectivamente, de acordo com suas fichas de dados. Portanto, o uso do CI ULN2803A atende

perfeitamente esta aplicação, onde foram usadas 4 unidades para acionar 29 relés, restando 3 pinos de um CI sem uso.

A maior parte das entradas recebidas pelo microcontrolador são usadas para ler os valores fornecidos pelos sensores de correntes, que consistem de um sinal de tensão entre 0 e 5 V, portanto foram usadas entradas analógicas. Estas entradas possuem um conversor analógico-digital, dispositivo que transforma valores contínuos, que podem assumir quaisquer valores dentro de uma escala, em valores discretizados, que podem assumir apenas um entre N valores estipulados dentro de outra escala. Neste caso, as portas analógicas do microprocessador trabalham com uma resolução de 10 bits, resultando numa escala de 2^{10} valores, ou ainda, 1024 valores. Desta forma, qualquer valor entre 0 e 5 V aplicado em uma entrada analógica será interpretado como um valor entre 0 e 1023 bits no programa.

Existem dois tipos de sinais que representam valores lidos de correntes elétricas, já que existem dois tipos de sensores. Os sensores comerciais já possuem circuito de tratamento de sinal. Portanto, estes sinais já podem ser ligados diretamente nas portas do microcontrolador. Tais sinais são levados da placa 1 de potência até a placa 1 de controle pelo cabo de 40 vias.

Os sinais provenientes das bobinas dos sensores produzidos, por outro lado, precisam ser tratados por um circuito amplificador. Este circuito está montado sobre um plano de terra, ao lado do microcontrolador, e as saídas deste circuito foram conectadas diretamente ao microcontrolador. Os sinais das bobinas chegam até o circuito amplificador por meio de cabos blindados. Existe um cabo para cada fase, com 6 fios cada, já que, por fase, existem 3 bobinas com um terminal positivo e um terminal negativo.

As últimas entradas e saídas usadas pelo microcontrolador fazem a comunicação com a placa da IHM, que consiste

de 1 tela e 6 botões. Para esta comunicação foram usadas apenas portas digitais, sendo 6 entradas e 3 saídas. Cada entrada, ao receber um sinal em nível lógico alto, representa que um botão específico foi pressionado pelo usuário do sistema. As três saídas servem para fazer a comunicação com a tela, por meio de uma comunicação serial.

3.2.1.2 Alimentação do sistema

A alimentação do sistema é feita por uma fonte de 12 V que possa fornecer até 2 A. Ao longo da placa de controle, o sinal de alimentação é distribuído para os componentes. A conexão precisa ser feita em dois pontos da placa, por meio de conectores P4 machos.

Um conector P4 macho deve ser acoplado na alimentação da placa do Arduino Mega. A partir de um dos pinos do microcontrolador será levado um sinal de 5 V para a placa da IHM, que servirá para alimentar o circuito de botões e a tela.

O segundo conector deve ser acoplado no conector P4 fêmea soldado na placa, ao lado de um capacitor de 2200 uF. A partir deste conector o sinal de 12 V será enviado para alguns dos 40 pinos que se comunicam com as placas de potência, para alimentar relés e um regulador de tensão. Existe ainda um fusível neste circuito de alimentação da placa de potência, para evitar problemas caso algum material encoste na placa durante a colocação desta na caixa de bornes da máquina e crie um curto-circuito entre os terminais positivo e negativo.

A tensão do conector P4 da placa também é usada para alimentar o circuito amplificador dos sensores produzidos, porém este circuito é sensível e exige uma alimentação muito estável. Durante testes iniciais foi observado que o sinal da

fonte de 12 V não é perfeitamente contínuo, por ser gerado por uma fonte chaveada. Com os componentes disponíveis em laboratório, foi implementado um filtro passa-baixa entre o sinal da fonte e o circuito, com um capacitor de 2200 μF e um resistor de 10 Ω . O filtro forneceu uma frequência de corte de 7,2 Hz, conforme (2.1), e estabilizou o sinal o suficiente para alimentar o circuito.

3.2.1.3 Programação

A programação foi feita em linguagem C, na plataforma Arduino. Um conceito importante para se manter em mente é que todo o código aqui escrito está dentro de um *loop*, ou seja, o código é executado de forma que, quando chegar ao fim, ele voltará ao início. O tempo para executar o *loop* uma vez varia de acordo com as tarefas que o microcontrolador estiver executando. A função do programa é receber entradas, por meio de botões e medições de correntes elétricas, e acionar relés a partir de saídas digitais. A seguir são explicados os passos que o programa executa, que podem ser visualizados no fluxograma na figura 21.

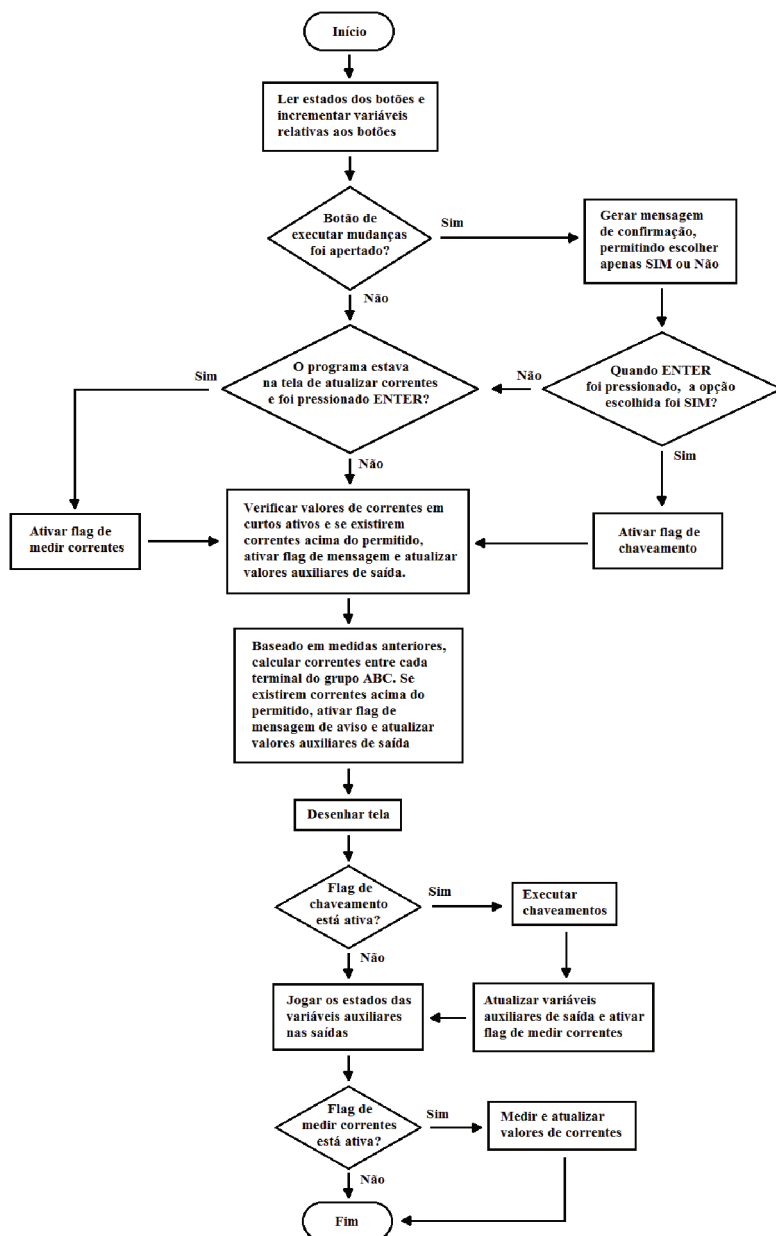
Inicialmente, são verificados os estados dos botões da IHM. Cada um dos quatro botões de navegação está relacionado a um índice para definir em qual página, ou linha de cada página, o usuário está. Estes índices são incrementados ou decrementados quando é detectada a borda de subida do sinal de um botão. Dependendo da tela em que o usuário se encontra, os botões podem interferir em variáveis diferentes. O botão ENTER, por exemplo, serve para selecionar relés a serem acionados, executar leitura de correntes ou selecionar opções de respostas para perguntas de confirmação.

Existe um botão apenas para fazer o programa executar as mudanças feitas pelo usuário, que podem ser selecio-

nadas sem que sejam executadas instantaneamente. Quando este botão é apertado, independentemente da tela em que se encontra, o programa irá gerar uma tela de confirmação, perguntando se o usuário realmente deseja executar os chaveamentos relativos às opções que foram selecionadas. Se o usuário selecionar “Sim”, o programa ativa uma variável que será usada mais à frente, para executar o chaveamento de quaisquer que sejam os relés selecionados. Caso a resposta “Não” seja selecionada, o programa irá voltar para a tela onde estava.

Em diversas telas o botão ENTER serve para o usuário escolher quais chaveamentos deseja aplicar. Porém, apenas quando o usuário estiver na tela de atualizar os valores de correntes, quando este botão for apertado o programa irá ativar uma variável que será usada em outra parte do programa para iniciar o processo de medição de correntes.

Figura 21 – Fluxograma do código programado no microcontrolador.



Fonte: Do autor.

O programa está constantemente monitorando as correntes dos curtos-circuitos que estão sendo impostos. Quando alguma destas correntes estiver acima de 15 A (a corrente nominal da máquina) será ativada uma variável que, no momento de desenhar a tela, fará com que apareça um aviso de segurança. Existem variáveis auxiliares de saída para representar o estado de cada relé (ativado ou desativado), que podem ser alteradas pelas escolhas do usuário ou pelo programa. Estas variáveis são atribuídas às saídas no final do programa. Portanto, se uma dessas variáveis for desativada, implica em desativar um relé. Quando um curto possuir corrente acima de 15 A, a variável auxiliar do relé que causa este curto é desativa.

As correntes de todos os ramos do circuito da figura 13, relativo ao grupo ABC, também são monitoradas a cada ciclo, a partir das correntes de fase, correntes de curtos e quais chaveamentos estão ocorrendo. Assim, dependendo dos curtos que estão sendo impostos e de qual terminal está selecionado, sabe-se as correntes entre cada terminal de cada fase. Foi decidido que qualquer corrente entre estes terminais não pode exceder 1,5 vezes a corrente nominal da máquina. Caso este valor seja atingido, a variável auxiliar do relé de curto que estiver causando esta sobrecorrente será desativada.

Por exemplo, mesmo que no curto-circuito entre A0 e A1 não esteja circulando 15 A, este curto pode estar contribuindo para que a corrente entre A0 e A1 seja maior do que 15A, já que a corrente neste ramo é igual à soma da corrente de fase com a corrente do curto entre tais terminais. Portanto, neste caso, se a corrente entre A0 e A1 exceder 1,5 vezes a corrente nominal da máquina, o curto-circuito entre estes terminais será desativado.

Enquanto não estiverem ocorrendo chaveamentos, a tela da IHM estará sendo desenhada conforme as páginas ou avisos mudam. Quando a variável que executa o chave-

amento estiver ativa, o programa inicia a rotina de ativar e desativar relés. Esta rotina é dividida por fase, para garantir desempenho e pelo fato de cada fase ser independente.

A rotina de chaveamento entre dois relés de seleção dos terminais de fase segue uma ordem específica e fará uso do relé auxiliar, como já foi mencionado na sessão 3.1.1. São executados quatro chaveamentos onde é importante manter sincronia e velocidade, porque enquanto este chaveamento é executado existirá um curto-circuito entre os terminais que estiverem sendo trocados e a corrente deste curto estará passando por pequenos resistores de potência.

Antes de um chaveamento entre terminais acontecer, sempre existirá um terminal que já estava selecionado, diga-se terminal 1, e o novo terminal que o usuário deseja selecionar, diga-se terminal 2. Ao iniciar o chaveamento, o relé auxiliar será fechado. Espera-se um tempo fixo de atraso e então o relé do terminal 1 é aberto. Em seguida, espera-se o mesmo tempo e o relé do terminal 2 é fechado. Finalmente, espera-se o tempo de atraso pela última vez e então o relé auxiliar pode ser aberto. Este tempo de atraso é aplicado para garantir que o próximo passo seja executado somente após o contato do relé realmente ter sido acionado, pois existe um atraso de tempo considerável entre o solenoide do relé ser energizado e a sua chave de fato abrir ou fechar. Para os relés do grupo ABC, este tempo é de até 15 ms, de acordo com a ficha de dados do dispositivo.

O chaveamento dos relés do grupo JK é mais simples, já que não existe um relé auxiliar. Desta forma, para executar a troca de um terminal para outro primeiro é acionado o relé desejado, espera-se um tempo, e então é desativado o relé que estava selecionado. Como os relés deste grupo são diferentes, tem-se um tempo de atraso diferente que, de acordo com a ficha de dados, é de 10 ms.

Os chaveamentos já trabalham diretamente acionando

os relés, ao invés de atualizar variáveis auxiliares de saída. Portanto, quando acabam todos os chaveamentos, o programa atualiza as variáveis auxiliares de saída para que fiquem condizentes com os estados em que os relés foram colocados.

Independentemente de ter ocorrido o chaveamento de relés, um dos últimos passos do programa é atribuir os estados das variáveis auxiliares nas saídas que acionam relés. Desta forma, se anteriormente foi detectado que algum relé de curto devesse ser desativado, é neste momento que ele efetivamente será desativado.

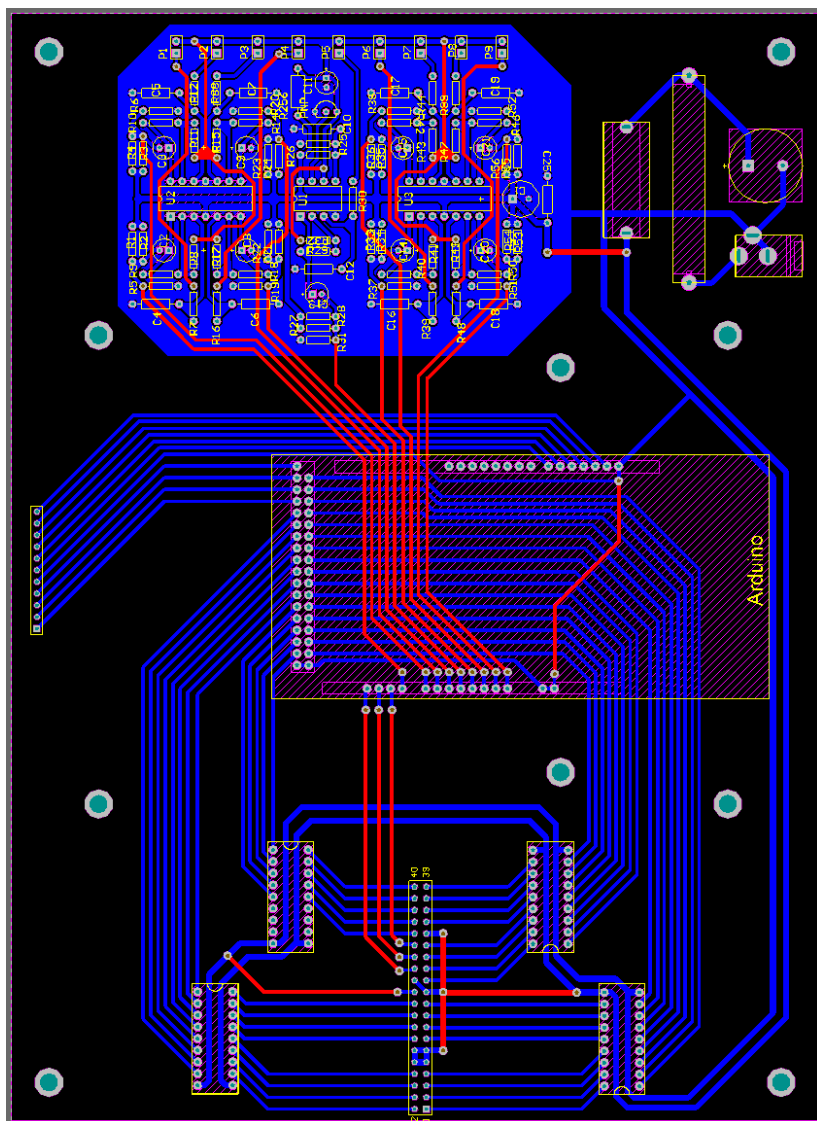
Por fim, o programa inicia a medição e a atualização das correntes elétricas, caso a variável que comanda tal função esteja ativa. Essa variável pode ser ativada por apenas dois eventos: ocorreu um chaveamento ou o usuário deu o comando para atualizar valores de correntes. As correntes não são lidas em todos os momentos.

Estes passos englobam todos os tratamentos lógicos necessários para o sistema de imposição de faltas funcionar, finalizando o programa. Ao chegar no fim, o programa recomenda todo este processo.

3.2.1.4 Circuito final

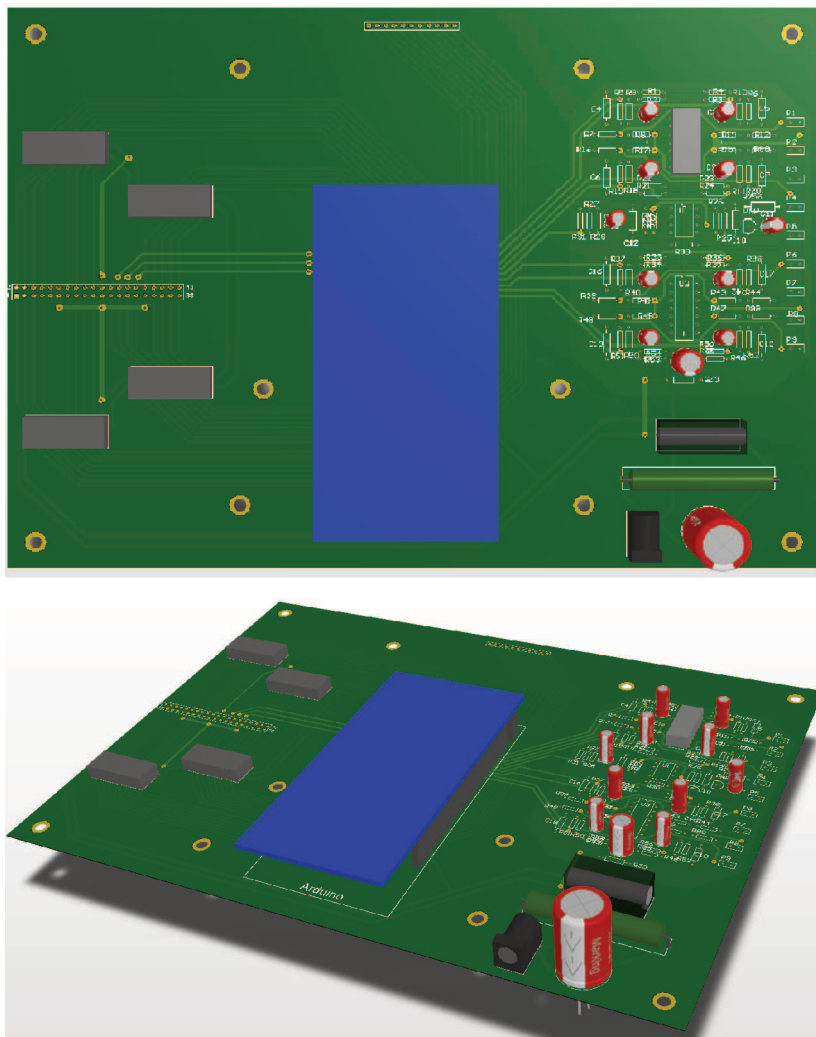
As figuras 22 e 23 a seguir representam a placa do microcontrolador.

Figura 22 – Conexões da placa do microcontrolador.



Fonte: Do autor.

Figura 23 – Representações 3D da placa do microcontrolador.



Fonte: Do autor.

3.2.2 IHM

A última placa do sistema, com a IHM, é montada sobre a placa do microcontrolador. A placa da IHM serve para comportar o circuito dos botões e o circuito da tela, um *display* LCD gráfico com resolução de 128 por 64 pixels.

3.2.2.1 Tela

Para a implementação de telas que pudessem interagir com o usuário, bem como para aprender diversas funcionalidades da plataforma Arduino, fez-se uso do site da plataforma, em especial a biblioteca de *display* gráfico "U8glib". Esta biblioteca é compatível com diversos modelos de *displays* e facilita o processo de desenhar retas, círculos, retângulos e escrever textos em diferentes fontes, tamanhos, sentidos e posições. A biblioteca ainda fornece funções que se encarregam de executar a comunicação com o *display*, tanto em modo serial como em paralelo.

Existem mais de vinte páginas criadas no programa. Algumas são estáticas, enquanto outras possuem partes que são alteradas conforme o usuário navega por elas com o cursor e seleciona opções. Para decidir qual página será desenhada a cada instante, o programa monitora diversas variáveis relativas à navegação e às correntes medidas. Aproximadamente um terço de todo o código escrito é referente ao desenho das páginas, sem levar em conta a lógica implementada para a decisão de quando cada página será desenhada.

As páginas por onde o usuário pode navegar para selecionar opções de chaveamentos são citadas a seguir, com as opções de comandos a serem ativados ou desativados:

- Fase A: Chavear em A0, Chavear em A1, Chavear em A2, Chavear em A3, Curto-Circuito entre A0 e A1, Curto-Circuito entre A1 e A2 e Curto-Circuito entre A2 e A3.
- Fase B: Chavear em B0, Chavear em B1, Chavear em B2, Chavear em B3, Curto-Circuito entre B0 e B1, Curto-Circuito entre B1 e B2 e Curto-Circuito entre B2 e B3.
- Fase C: Chavear em C0, Chavear em C1, Chavear em C2, Chavear em C3, Curto-Circuito entre C0 e C1, Curto-Circuito entre C1 e C2 e Curto-Circuito entre C2 e C3.
- Rotor: Chavear em J0, Chavear em J1, Chavear em J2 e Chavear em J3.
- Núcleo: Curto do Núcleo.

A comunicação com a tela faz o uso de três portas de saída digital do microcontrolador, já que foi usada a comunicação serial. Como a biblioteca da tela já possui a função de comunicação, foi necessário apenas configurar quais seriam os pinos usados pela função e conectá-los aos pinos corretos do *display*. Um dos pinos do *display* serve ainda para indicar qual o tipo de comunicação implementada, sendo nível lógico alto para comunicação paralela e baixo para serial. Portanto, este pino foi aterrado (nível lógico baixo).

Além dos sinais para comunicação, os pinos da tela necessitam de tensões para alimentação, iluminação e contraste. A alimentação é feita com 5 V e Terra, proveniente de pinos do microcontrolador. A intensidade da iluminação de fundo da tela será proporcional à tensão aplicada entre dois pinos, sendo que, neste caso, foram aproveitados os mesmos sinais de 5 V e Terra da alimentação (em testes também

foi observado funcionamento com 3,3 V). O contraste entre *pixels* ligados e *pixels* desligados é feito por outro sinal que pode variar entre 0 e 5 V. O contraste é um parâmetro que afeta muito a leitura do *display*, portanto foi implementado um pequeno potenciômetro (chamado de *Trimpot*) para que o usuário pudesse ajustar este parâmetro a qualquer momento, usando da forma que julgasse melhor. O pino central deste dispositivo fornece o sinal de contraste.

Trimpot é um componente resistivo de três pinos. Entre o primeiro e o terceiro pino existe uma resistência fixa, enquanto entre o primeiro e o segundo pino existe uma resistência que pode ser variada ao girar a parte central do dispositivo, semelhante a um parafuso. A resistência entre o segundo e o terceiro pino também é variável, pois esta é igual a resistência total do dispositivo diminuída da resistência entre o primeiro e o segundo pino. Com estas características, se for aplicada uma tensão fixa entre os pinos extremos, existirá uma tensão no pino central que varia conforme a parte central do dispositivo é girada. O *Trimpot* usado possui uma resistência de 10 k Ω e foi alimentado com os sinais de 5 V e Terra da alimentação.

O *display* LCD usado possui 20 pinos, onde o pino 1 é o primeiro pino à direita do componente, quando este estiver sendo observado com a tela virada para cima e com a barra de pinos disposta em baixo. A tabela 1 resume a descrição de cada pino usado do *display*, bem como qual foi o sinal conectado em cada pino, da forma como foi aplicada neste projeto.

Tabela 1 – Pinos usados do display LCD.

Pino	Descrição	Sinal conectado
1	Alimentação -	Terra
2	Alimentação +	5 V
3	Contraste	Pino central do Trimpot
4	Pino de comunicação	Porta digital do Arduino
5	Pino de comunicação	Porta digital do Arduino
6	Pino de comunicação	Porta digital do Arduino
15	Tipo de comunicação	Terra
19	Iluminação de fundo +	5 V
20	Iluminação de fundo -	Terra

Fonte: Do autor.

3.2.2.2 Botões

A única forma de dar comandos ao sistema de imposição de faltas é por meio dos botões, dispostos de forma a tornar a interação com o sistema intuitiva e simples. Existem 6 botões, onde 4 destes servem para navegação entre as páginas e 2 servem para dar comandos específicos. Para facilitar a compreensão, os botões serão chamados de: CIMA, BAIXO, ESQUERDA, DIREITA, ENTER e EXECUTAR MUDANÇAS. A disposição dos botões pode ser observada na figura 26.

Os botões de navegação ESQUERDA e DIREITA servem apenas para o usuário trocar as páginas em que a tela se encontra. Os botões CIMA e BAIXO movem o cursor, um retângulo de navegação que fica em volta da opção a ser selecionada. Existem páginas onde não cabem todas as opções na tela. Nestes casos, aparece uma pequena seta apontando a direção em que a página se estende. Estas setas podem aparecer na parte inferior da tela, apontando para baixo, ou

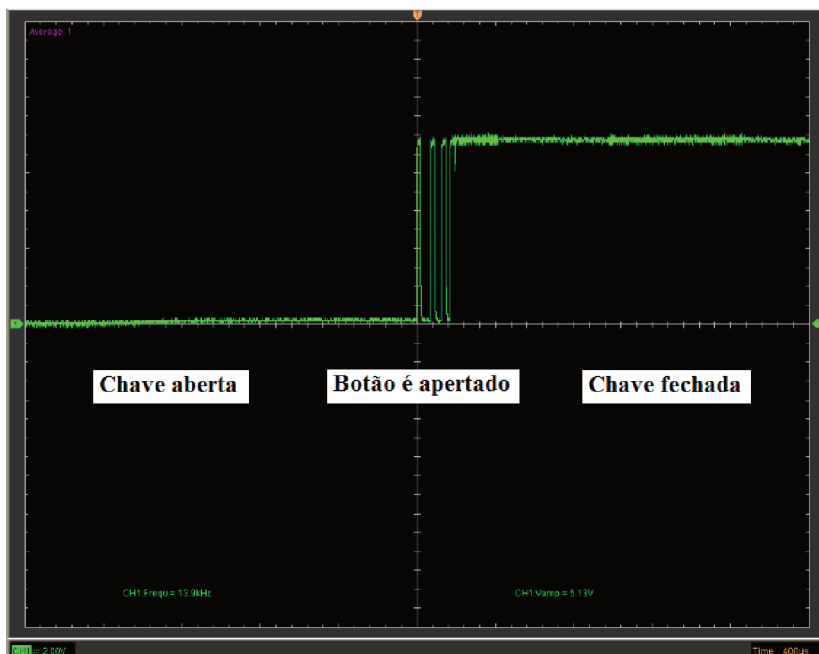
na parte superior da tela, apontando para cima.

Toda opção de chaveamento que o usuário pode aplicar possui um quadrado ao lado, que representa se esta opção está, ou não, selecionada. O botão ENTER existe para fazer ou desfazer esta seleção. O usuário pode selecionar quantas opções quiser, levando o tempo que desejar, pois durante esse processo não ocorre nenhum chaveamento. No momento em que o usuário pressionar o botão EXECUTAR MUDANÇAS, o sistema pergunta se o usuário realmente deseja aplicar os chaveamentos escolhidos e apenas permite responder “Sim” ou “Não”. O usuário deve, então, usar os botões ESQUERDA ou DIREITA para escolher a opção desejada e pressionar ENTER. Caso a opção “Sim” seja escolhida, os chaveamentos selecionados começam a ser executados.

Para interpretar o estado do botão, o microcontrolador, que trabalha com tensões de 5 V, considera um sinal de nível lógico alto em sua entrada digital como botão apertado, já que o botão consiste de uma chave aberta conectada em 5 V e em uma porta do microcontrolador. Porém, existe um comportamento dos botões que pode “confundir” o microcontrolador, chamado de *bounce*. A tradução desta palavra significa “pulo” e expressa justamente o comportamento do sinal que passa por um botão. Idealmente, o sinal passaria de um nível lógico baixo para um nível lógico alto instantaneamente após o botão ser pressionado. Entretanto, o que acontece é que o sinal oscila, ou pula. Se este comportamento não for tratado, o microcontrolador pode interpretar essa transição oscilatória como vários pressionamentos no botão, quando na verdade o botão foi pressionado apenas uma vez.

Para corrigir este comportamento, em todos os botões foi aplicado um método demonstrado por Almeida (2014), bem como por Christoffersen (2015), onde é usado, além da chave, um resistor e um capacitor. Com estes componentes

Figura 24 – Sinal sobre a chave de um botão sofrendo *bounce*.



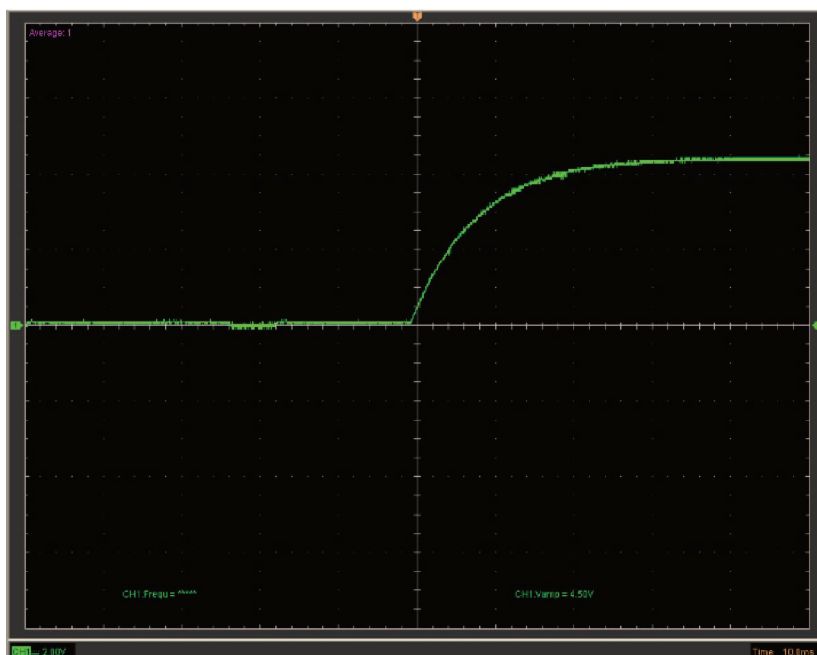
Fonte: Christoffersen, 2015.

implementa-se um circuito RC, onde o capacitor é responsável por amortecer a transição do sinal, tanto para um sinal passando para nível lógico alto, como para um sinal passando para nível lógico baixo. O circuito RC possui a característica de causar um atraso na transição do sinal, pois existe um tempo necessário para carregar o capacitor. Segundo Almeida, esse tempo serve como um filtro, já que o *bounce* ocorre por causa de rápidas oscilações mecânicas, durante período de tempo muito curto.

Christoffersen fez aquisições de sinais que representam muito bem o *bounce*, bem como de sinais onde o comportamento foi corrigido por meio de um circuito RC. As figuras

24 e 25 representam estes sinais.

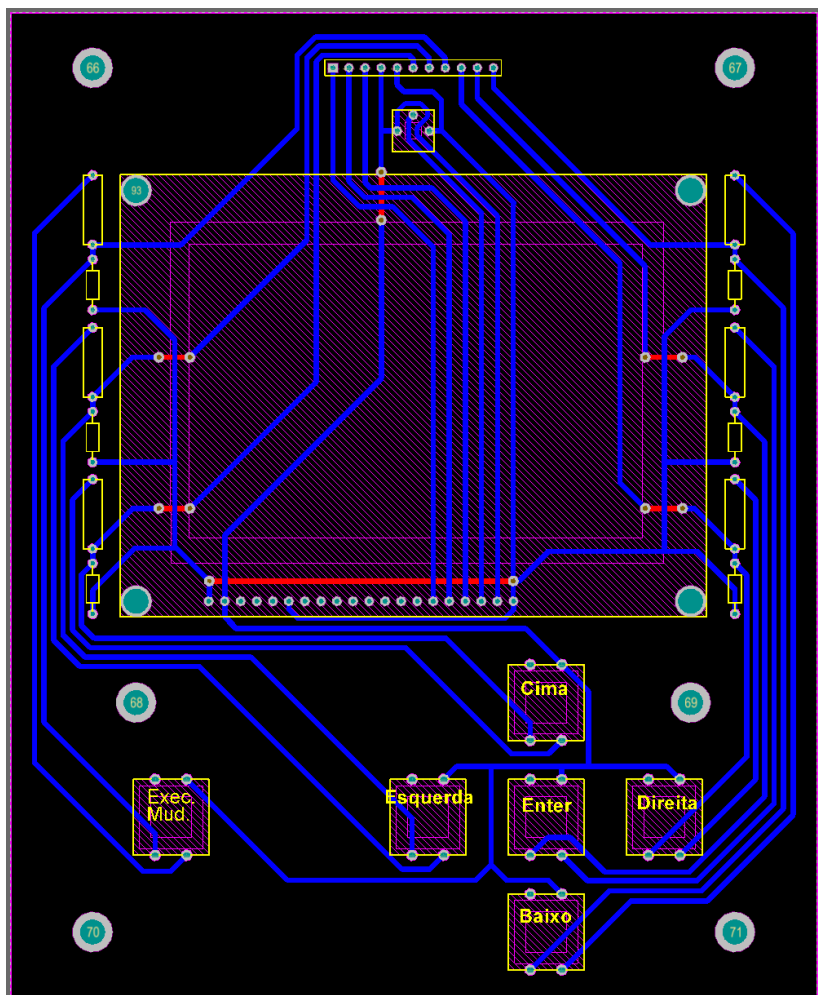
Figura 25 – Sinal sobre a chave de um botão com circuito RC para correção de *bounce*.



Fonte: Christoffersen, 2015.

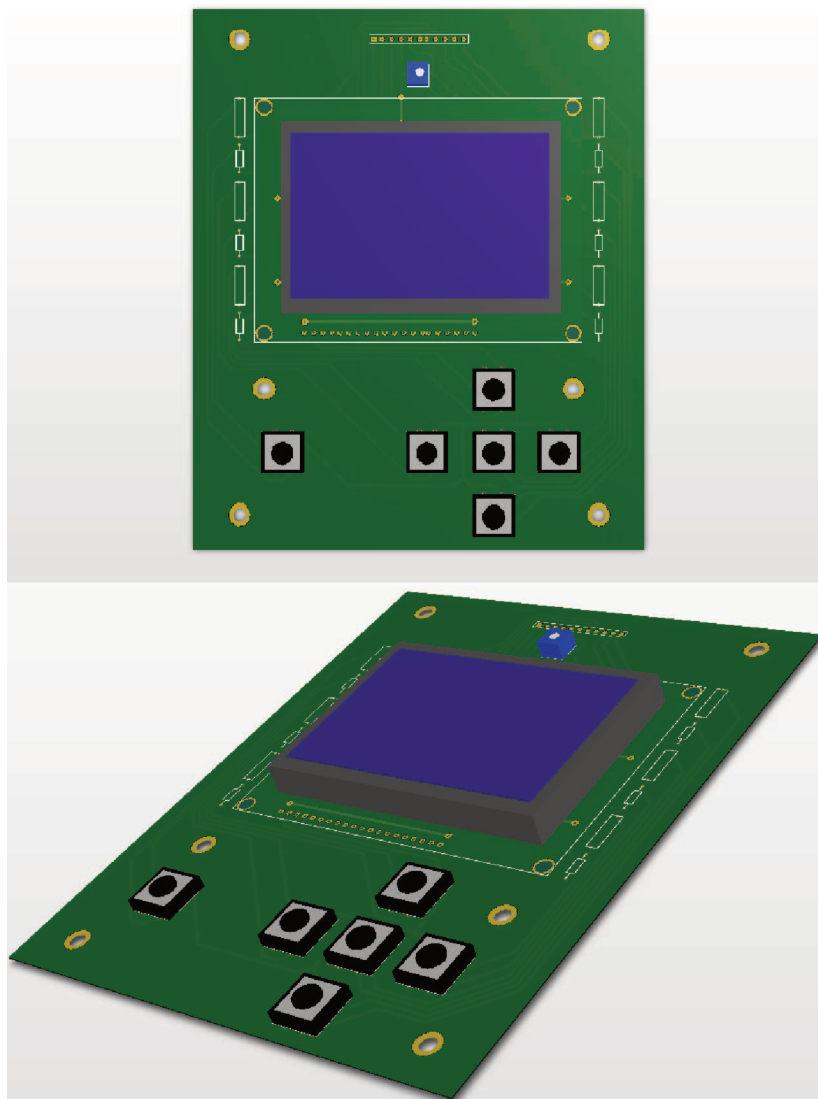
3.2.2.3 Circuito final

As figuras 26 e 27 a seguir representam a placa da IHM.



Fonte: Do autor.

Figura 27 – Representações 3D da placa da IHM.

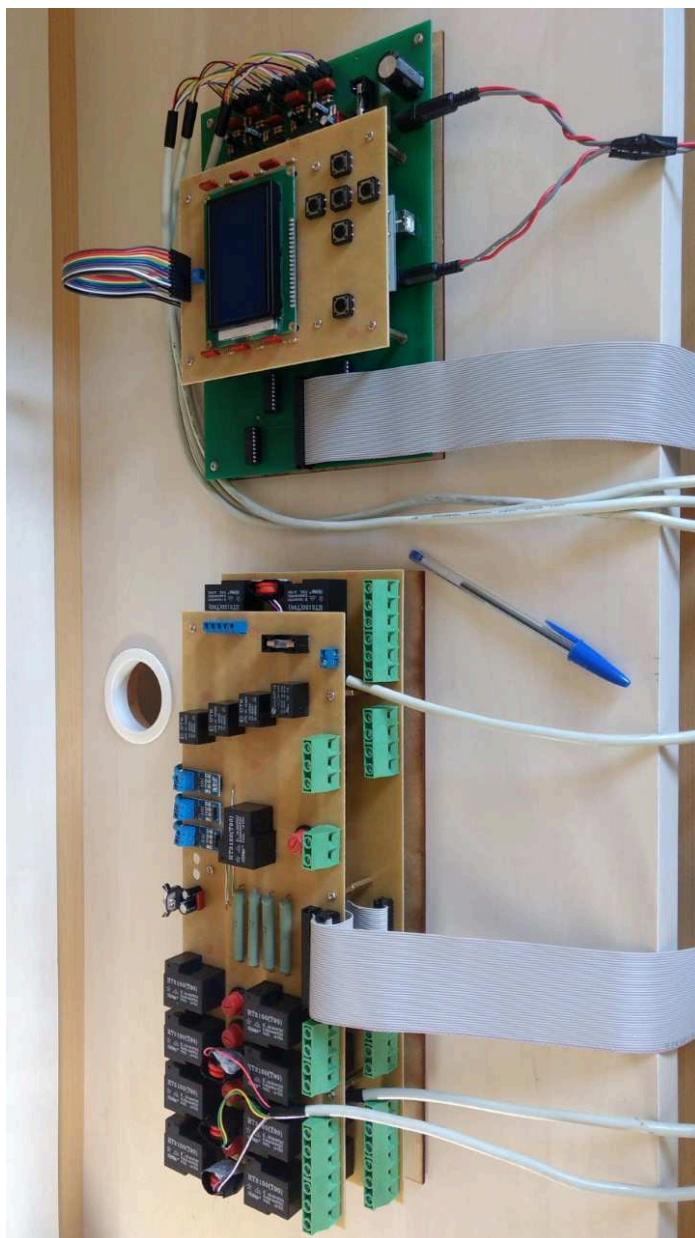


Fonte: Do autor.

3.3 SISTEMA COMPLETO

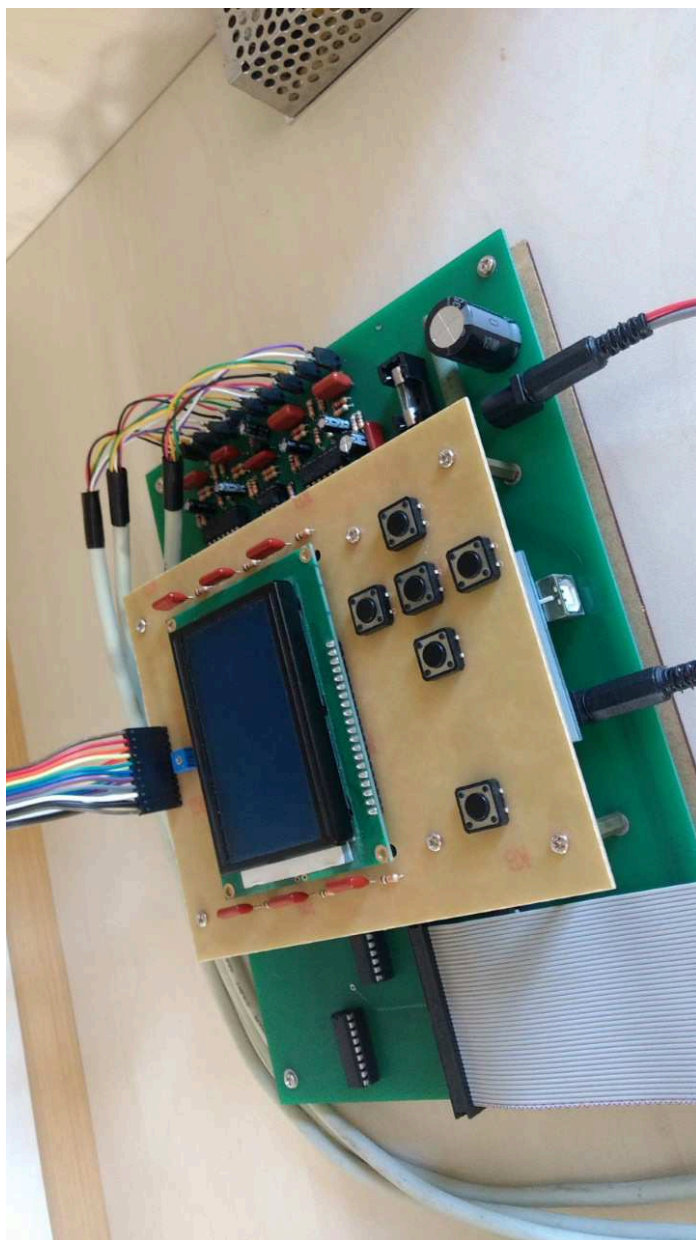
As figuras 28, 29 e 30 a seguir mostram o sistema de imposição de faltas em máquina síncrona com todas as suas placas e componentes montados.

Figura 28 – Sistema completo montado.



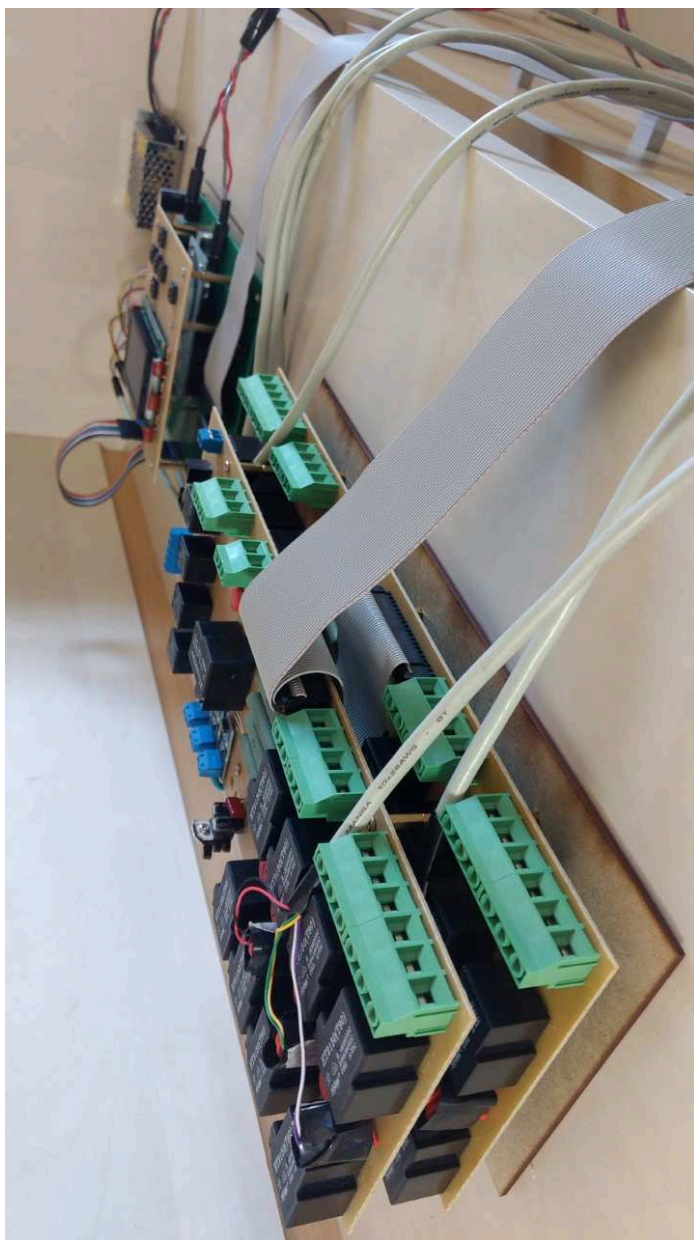
Fonte: Do autor.

Figura 29 – Sistema completo montado.



Fonte: Do autor.

Figura 30 – Sistema completo montado.



Fonte: Do autor.

4 IMPLEMENTAÇÃO DE SENSORES DE CORRENTE

Este capítulo apresenta o desenvolvimento e construção de um sensor de corrente, do tipo Transdutor de Corrente para Tensão (TCT), de baixo custo e ampla faixa de operação. Consiste em um transformador com núcleo de ar, acoplado a um circuito de filtragem e amplificação, empregando amplificadores operacionais, a fim de fornecer sinais adequados para leitura em um microcontrolador.

A concepção da ideia de produzir tal dispositivo originou-se de três pontos chave: custo, aplicação e aprendizado. Inicialmente, foi considerado utilizar medidores de corrente comerciais. Porém, como o sistema em questão necessita de vários medidores, isto implicaria em alto custo. Além disso, os medidores comerciais apresentam uma precisão elevada e, de certa maneira, desnecessária para a aplicação em questão. Por outro lado, havia a necessidade de um medidor de corrente para ampla faixa de amplitude, de alguns ampères até cerca de duas dezenas de ampères, sem a necessidade de se alterar escalas. Isto é, é importante que o sistema de medição também fosse robusto. Para o monitoramento das correntes de curto-circuito, a precisão não é crítica. Deseja-se apenas monitorar as correntes de curto-circuito e garantir que suas amplitudes não estejam acima de certo limite. Dentro deste contexto, procurou-se desenvolver uma solução própria e específica para o dispositivo de monitoramento e, principalmente, visando ao aprendizado de aluno em nível de graduação.

4.1 ACOPLAMENTO DE BOBINAS

O sensor de corrente é baseado no acoplamento magnético de dois conjuntos de espiras isolados galvanicamente, em uma montagem que forma um transformador com núcleo de ar, com os centros dos dois conjuntos de espiras fisicamente coincidentes. O fluxo magnético gerado no primeiro conjunto de espiras (primário) atravessa parcialmente as espiras do segundo conjunto (secundário) em aberto. Assim, induz-se uma tensão elétrica no enrolamento secundário devido ao fluxo magnético alternado, gerado pela corrente elétrica alternada no primário, conforme a Lei de Faraday. O equacionamento da tensão induzida no secundário v_{sec} em função da corrente i que circula no primário pode ser realizado de maneira simplificada a partir de duas equações:

- (4.1) permite calcular o valor do campo magnético no centro das N_p espiras do enrolamento primário, de raio médio r , percorridas por uma corrente i .

$$H = \frac{N_p i}{2r} \quad (4.1)$$

- (4.2), da Lei de Faraday, permite calcular a tensão induzida na bobina secundária. Supõe-se que o campo magnético seja uniforme sobre toda secção transversal S da bobina de N_s espiras e que todo o campo produzido pela corrente no enrolamento primário esteja também excitando o enrolamento secundário (acoplamento perfeito). O núcleo é de ar.

$$v_{sec}(t) = -\mu_0 N_s S \frac{dH}{dt} \quad (4.2)$$

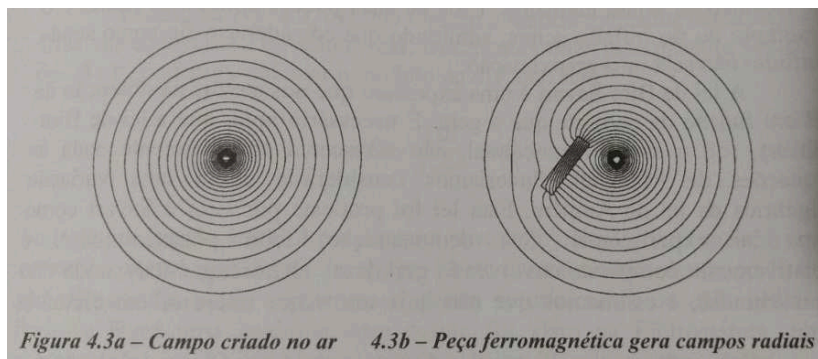
Considerando que um transformador de núcleo de ar operando em frequência de 60 Hz possui dispersão considerável e, ainda, levando em conta que a secção transversal útil do secundário pode conter erros devido a imprecisões na determinação do raio médio, pode-se inserir também uma constante k para aferição. Assim, tem-se (4.3) para a tensão induzida no secundário em função da corrente de entrada.

$$v_{sec}(t) = -\mu_0 k \frac{N_p}{2r} N_s S \frac{di}{dt} \quad (4.3)$$

A introdução de um material com alta permeabilidade magnética no núcleo teria ajudado a concentrar e aumentar o fluxo magnético da bobina primária, atravessando ambas as bobinas, de maneira que a tensão no secundário seria praticamente proporcional ao fluxo da bobina primária, desde que o material não saturasse. Isto é, haveria uma menor dispersão. Tal propriedade física é explicada e demonstrada, conforme a figura 31, por Bastos (2008):

[...] observemos as Fig. 4.3a e 4.3b. Na primeira temos um fio infinito no ar. O campo, obtido por análise numérica, apresenta a forma esperada, ou seja, totalmente tangencial. Já na Fig. 4.3b é colocada no domínio uma peça de material com alta permeabilidade. Por sua própria natureza, a mesma irá atrair o fluxo magnético, fazendo com que apareçam componentes radiais de campo. (p. 147).

Figura 31 – Demonstração da influência de uma peça ferromagnética na distribuição do campo magnético.



Fonte: Bastos, 2008.

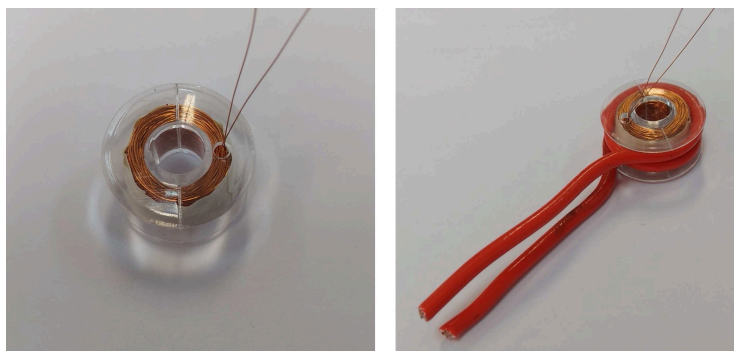
Para tornar o processo de montagem simples, não foi introduzido nenhum material na região interna (núcleo) entre as bobinas. A tensão gerada no secundário é proporcional ao número de espiras, que pode ser elevado para facilitar a medição do sinal.

O conjunto primário é composto pelo condutor onde circula a corrente a ser medida. Este condutor deve ter uma área de seção transversal maior que o do secundário. Definiu-se que o primário precisaria suportar uma corrente elétrica eficaz de até 15 A. Foi empregado um condutor de $2,5 \text{ mm}^2$. Além disso, para não afetar os testes, não é desejável introduzir resistências e indutâncias relevantes no primário, a fim de não modificar o comportamento da corrente a ser medida. Assim, evitou-se construir a bobina do primário com muitas espiras. Sob o aspecto do secundário, devido ao baixo acoplamento entre os enrolamentos primário e secundário, e que a operação é em 50 Hz ou 60 Hz, sabe-se que as amplitudes correspondentes das tensões induzidas no enrolamento não são relativamente elevadas. Devido à necessidade de várias espi-

ras no secundário e que não há corrente passando por elas, o condutor do enrolamento secundário foi escolhido com área de seção transversal relativamente pequena, de $0,0063 \text{ mm}^2$. Um condutor desta bitola também facilita a construção da bobina secundária.

Por conta das dimensões de cada condutor e dos motivos já citados, foi decidido que a bobina do primário possuiria apenas duas espiras e que a bobina do secundário possuiria quinhentas espiras. Desta forma, foi possível manter uma construção relativamente compacta e que ocupasse apenas o volume do carretel que foi usado como estrutura para suportar as bobinas. A figura 32 mostra fotos de um dos sensores contruídos.

Figura 32 – Fotos de um sensor contruído: a esquerda do enrolamento secundário e, à direita, do sensor finalizado com a superposição do enrolamento primário.



Fonte: Do autor.

4.2 CIRCUITO ANALÓGICO

O sistema de medição completo é composto por duas partes e juntos formam o TCT. A primeira parte, descrita

anteriormente, é o sensor composto simplesmente pelas bobinas com núcleo de ar. A segunda parte consiste de um circuito analógico para tratar o sinal de tensão induzida na bobina secundária: filtrar e adequar este sinal aos níveis de tensões desejados pelo sistema que faz a leitura do sinal (microcontrolador). O esquemático completo do circuito implementado encontra-se no apêndice A.

O microcontrolador empregado opera suas entradas analógicas com valores de tensão entre 0 e 5 V. Assim, o sinal alternado precisa ser deslocado em uma quantidade contínua para poder medir tanto a parte do ciclo positivo, quanto do negativo, da corrente no enrolamento primário. Decidiu-se que o circuito para tratar o sinal trabalhe em torno de uma referência de tensão contínua de 2,5 V, reproduzindo uma onda de tensão senoidal (proporcional à corrente senoidal da bobina primária) dentro de uma escala, onde o valor máximo pode chegar até 5 V e o mínimo, no valor de 0 V. Assim, quando não existir corrente circulando pela bobina primária, a saída do circuito eletrônico que trata o sinal de tensão induzida terá uma tensão contínua de valor de 2,5 V.

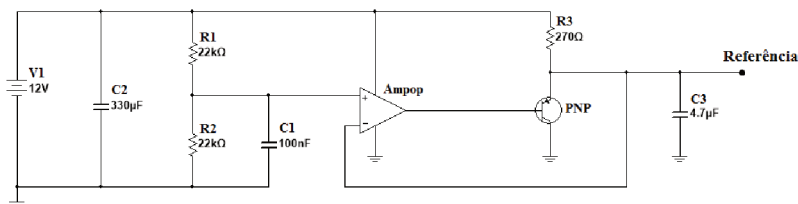
O circuito eletrônico analógico de tratamento dos sinais dos sensores é constituído, basicamente, por amplificadores operacionais que amplificam o sinal alternado recebido da bobina secundária do sensor. No sistema foram usados nove sensores, de modo que se têm nove unidades da parte de amplificação do sinal alternado.

Toda a alimentação dos circuitos provém de uma fonte DC simples não simétrica de 12 V. Desta maneira, é necessário criar uma referência deslocada para operar os amplificadores operacionais, “imitando” uma tensão simétrica.

4.2.1 Circuito de referência deslocada

A figura 33 apresenta o esquemático do circuito eletrônico. O circuito recebe 12 V DC de uma fonte externa e converte este valor para uma tensão simétrica de +6 V e -6 V por meio de um divisor resistivo. Em seguida, aplica-se a topologia de uma simples fonte de corrente, conectada à referência, com um amplificador operacional, um transistor PNP e um resistor de 270 Ω . Também, foram adicionados alguns capacitores de filtragem ao longo do circuito, para garantir estabilidade nas tensões de alimentação.

Figura 33 – Esquemático do circuito de referência deslocada.



Fonte: Do autor.

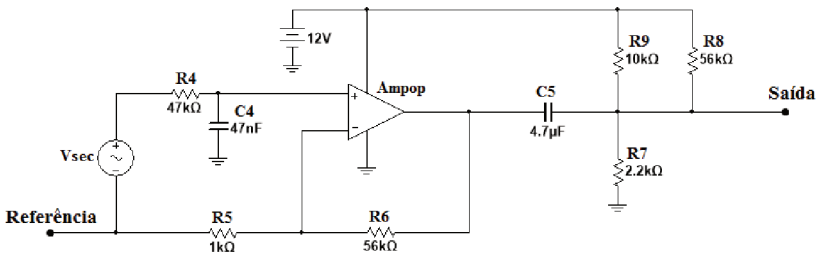
É importante ressaltar que este circuito de referência possui dois limites máximos de corrente. Um limite é definido quando a corrente sai da referência. Neste caso, a corrente é suprida pelo resistor de 270 Ω . Outro limite é definido quando a corrente entra para a referência. Neste caso, a corrente é drenada pelo transistor fornecendo um limite máximo superior. Como os circuitos amplificadores, que serão vistos a diante, possuíam as correntes da parte positiva e negativa quase totalmente balanceadas, a corrente que flui pela referência tende a zero. Portanto, para garantir que o transistor drene corrente e mantenha as tensões simétricas equivalentes em módulo, foi necessária a inserção do resistor

de $270 \, \Omega$.

4.2.2 Circuito amplificador

A segunda parte do circuito, onde é conectada a bobina do enrolamento secundário do sensor, consiste basicamente de um amplificador operacional usado na topologia de amplificador não-inversor. Além do amplificador não inversor, há um filtro passabaixa ligado previamente com uma frequência de corte um pouco acima de 60 Hz (72 Hz). Finalmente, é extraída apenas a componente de tensão alternada do sinal amplificado, por meio de um capacitor, e adicionada uma componente contínua de 2,5 V com associação de resistores, conforme a necessidade da aplicação em questão, obtida pela associação dos resistores R7, R8 e R9. A figura 34 representa o esquemático do circuito.

Figura 34 – Esquemático do circuito amplificador.



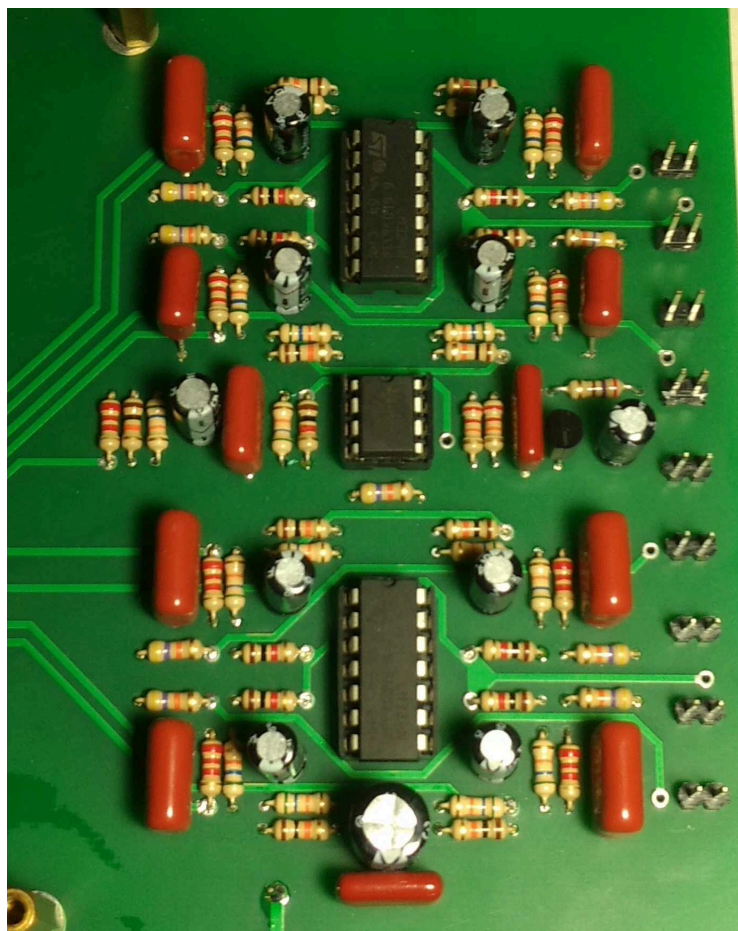
Fonte: Do autor.

A relação entre os sinais de saída e entrada do amplificador, ou seja, o ganho aplicado ao sinal, é dado por (2.2). Portanto, o ganho deste circuito é de 57 vezes. Inicialmente, não era conhecida a amplitude do sinal proveniente da bobina secundária do sensor, já que a falta de um núcleo

com alta permeabilidade magnética tornava a relação de ganho muito menor do que a relação do número de espiras das bobinas. Logo, o ganho que circuito amplificador deveria fornecer era desconhecido. Portanto, o valor do resistor de $56\text{ k}\Omega$ foi obtido experimentalmente.

A figura 35 apresenta uma foto do circuito eletrônico completo implementado.

Figura 35 – Foto do circuito completo montado.



Fonte: Do autor.

5 ENSAIOS DOS SENSORES DE CORRENTE

Além de realizar um ensaio para validar a funcionalidade do TCT produzido, foi necessário realizar a calibração para cada sensor. O dispositivo em si tem a funcionalidade de fornecer um sinal de tensão alternada proporcional à corrente alternada que estiver sendo medida. Por conta disso, deve existir uma constante (ou função) de sensibilidade. Tal valor de sensibilidade possui uma unidade de medida de tensão por corrente. Com o conhecimento desta grandeza, o usuário conseguirá interpretar qual a corrente que passa pelo sensor a qualquer momento simplesmente analisando a tensão de saída gerada pelo mesmo.

5.1 CALIBRAÇÃO DA SENSIBILIDADE

O processo de calibração foi executado para cada sensor, pois eles foram montados de forma manual, o que torna o processo de fabricação impreciso e altera o posicionamento entre as bobinas primária e secundária. A contagem manual do número de voltas de espiras também permite espaço para erros. Para expor os dados de forma objetiva, será analisado apenas um sensor nesta sessão do trabalho, mas todos demonstraram respostas muito similares.

O ensaio de calibração consistiu em injetar corrente elétrica alternada (com frequência de 60 Hz) na bobina primária do sensor e medir a tensão (pico-a-pico) na saída do circuito amplificador. O primeiro objetivo foi verificar a linearidade do sistema, pois, confirmando esta característica para um sensor, poder-se-ia deduzir que os outros sensores se comportariam da mesma forma. O segundo objetivo foi levantar a curva de sensibilidade para observar se esta perma-

nece constante para diferentes valores de corrente. Por fim, verificou-se também se o circuito sempre manteria a componente contínua fixa em 2,5 V.

Os instrumentos de medidas usados foram: osciloscópio, sonda de corrente e sonda clipe, todos da marca Tektronix. Além desses, foram utilizados: sensores de corrente, circuito amplificador, transformador com tensão de saída variável (*varivolt*) e fonte de tensão contínua de 12 V. Durante o experimento foram levantadas 16 relações de corrente de entrada por tensão de saída. A tensão do *varivolt* foi iniciada em zero e aos poucos foi aumentada manualmente, para que fosse obtida uma corrente desejada (medida pelo osciloscópio). A intenção era atingir valores inteiros de corrente eficaz (1 A, 2 A, 3 A ...) para manter um passo constante no incremento de corrente. Entretanto, como o ajuste do equipamento é manual, não foram obtidos valores inteiros. O experimento gerou a tabela 2.

Os dados da tabela 2 foram utilizados para gerar o gráfico apresentado na figura 36. Visualmente, é possível concluir que a relação entre corrente de entrada e tensão de saída é satisfatoriamente linear.

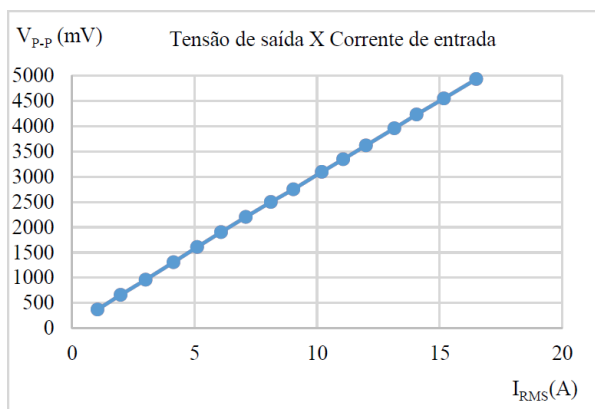
Durante as medições, foi observado que o sinal de tensão alternada da saída do circuito amplificador se manteve em torno de 2,5 V DC, como esperado. Para qualquer valor de corrente a se medir, o microcontrolador faria análise dos valores de pico da onda de tensão que o circuito fornece. Desta forma, levantou-se a curva de sensibilidade do sensor a partir de manipulação dos dados da tabela 2, sendo que a sensibilidade estaria atrelada a tensão de pico em relação aos 2,5 V DC do sinal. Portanto, a sensibilidade (em milivolts por ampere) foi calculada como a tensão de pico-a-pico (V_{P-P}) dividida por 2 e dividida pela corrente eficaz (I_{RMS}), gerando os dados da tabela 3, que está representada graficamente na figura 37.

Tabela 2 – Relação entre corrente de entrada e tensão de saída do sensor de corrente.

I_{RMS} (A)	V_{P-P} (mV)
1,04	368
1,99	656
3,00	960
4,15	1306
5,11	1603
6,08	1900
7,10	2202
8,11	2497
9,03	2750
10,19	3092
11,07	3347
12,00	3620
13,16	3960
14,06	4230
15,18	4552
16,50	4933

Fonte: Do autor.

Figura 36 – Gráfico expondo a relação entre tensão de saída e corrente de entrada do sensor.



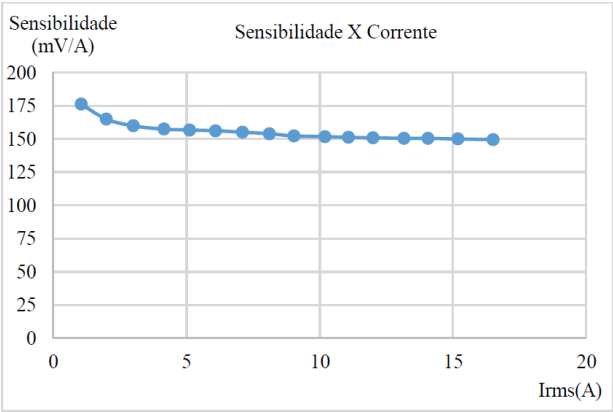
Fonte: Do autor.

Tabela 3 – Relação da sensibilidade do sensor para diferentes valores de corrente.

I_{RMS} (A)	Sensibilidade (mV/A)
1,04	176,25
1,99	164,99
3,00	159,84
4,15	157,39
5,11	156,73
6,08	156,15
7,10	155,07
8,11	153,91
9,03	152,25
10,19	151,72
11,07	151,17
12,00	150,83
13,16	150,46
14,06	150,43
15,18	149,93
16,50	149,48

Fonte: Do autor.

Figura 37 – Relação entre sensibilidade e corrente de entrada do sensor.



Fonte: Do autor.

Analisando visualmente a curva da figura 37, pode-se concluir que a sensibilidade permanece relativamente constante a partir de uma corrente de aproximadamente 10 A. A sensibilidade praticamente se estabiliza em torno de 150 mV/A. Assim, para medir uma corrente de pico, o microcontrolador precisa apenas identificar a tensão de pico e dividir este valor por 0,15.

5.2 COMPARAÇÃO COM INSTRUMENTO COMERCIAL

A fim de validar a funcionalidade do TCT em uma aplicação prática, bem como testar a programação a ser aplicada na interpretação do sinal do sensor, foi executado um ensaio para comparar o TCT desenvolvido com um medidor de corrente comercial.

O sistema usado para tal ensaio possui diversos conectores, relés e componentes eletrônicos. Os componentes relevantes para o teste foram: um microcontrolador Arduino Mega, um *display* LCD gráfico, três sensores de corrente, três relés e um alicate amperímetro. Aproveitando-se da forma como estão dispostos os sensores em relação ao circuito do sistema, a partir do acionamento dos relés e do uso de conectores específicos da placa, os sensores foram conectados em série. Neste circuito foram injetadas correntes diferentes por meio de um *varivolt*, sendo estas monitoradas por um alicate amperímetro, enquanto era executado o comando para o microcontrolador ler as correntes de cada sensor. As correntes lidas pelo microcontrolador foram escritas no *display* LCD para o usuário fazer a leitura.

Como o alicate amperímetro e os três sensores estão em série, idealmente seria lida uma corrente medida exatamente igual para os quatro equipamentos. Cada sensor possui uma curva diferente de sensibilidade, portanto para a leitura de

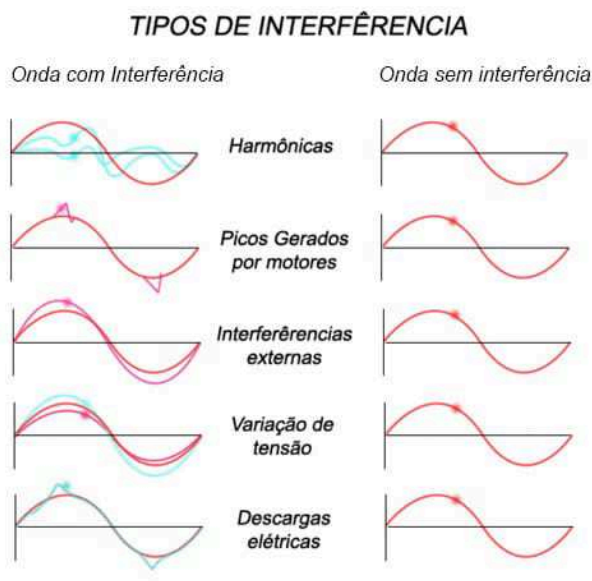
corrente de cada sensor o microcontrolador faz uso de uma constante diferente. Sendo assim, é possível uma leve diferença de medidas entre os sensores. A premissa do sensor seria monitorar correntes para detectar quando estas estivessem acima de 7,5 A, para chavear relés que iriam interromper curtos-circuitos. Considerando esta premissa e a robustez da máquina que estaria gerando a corrente medida, aceitar-se-ia um erro de até 10 % para as medições de cada sensor em relação ao instrumento de medida comercial.

Considerando que o sensor estará posicionado dentro de uma máquina por onde circulam correntes elevadas, é importante analisar o sinal do sensor de forma cautelosa, a fim de filtrar interferências eletromagnéticas. A análise aplicada neste caso com o microcontrolador consiste em amostrar a onda de tensão senoidal proveniente do circuito amplificador e guardar os dois valores extremos da onda, os pontos máximo e mínimo. A figura 38 representa graficamente o comportamento de sinais sofrendo diferentes tipos de interferência, características que idealmente seriam filtradas pelo sistema.

Para amostragem do sinal, as entradas analógicas estão trabalhando em uma frequência um pouco acima de 2500 Hz, fornecendo aproximadamente 42 pontos de amostragem por ciclo de onda. Importante observar que a taxa de amostragem deve obedecer ao Teorema de Amostragem de Nyquist, que observa que “Um sinal limitado em faixa a B Hz pode ser reconstruído exatamente de suas amostras se a taxa de amostragem for $f_s > 2B$ Hz (teorema da amostragem)” (B. P. Lathi, 2007, p. 723). Como, neste caso, o sinal amostrado tem frequência de 60 Hz, a taxa de amostragem usada é mais do que o suficiente para que o sinal seja totalmente registrado e interpretado, em teoria.

O processo de amostragem é aplicado diversas vezes, a fim de eliminar picos e variações de tensão. A partir do

Figura 38 – Representação gráfica de sinais sofrendo diferentes tipos de interferência.



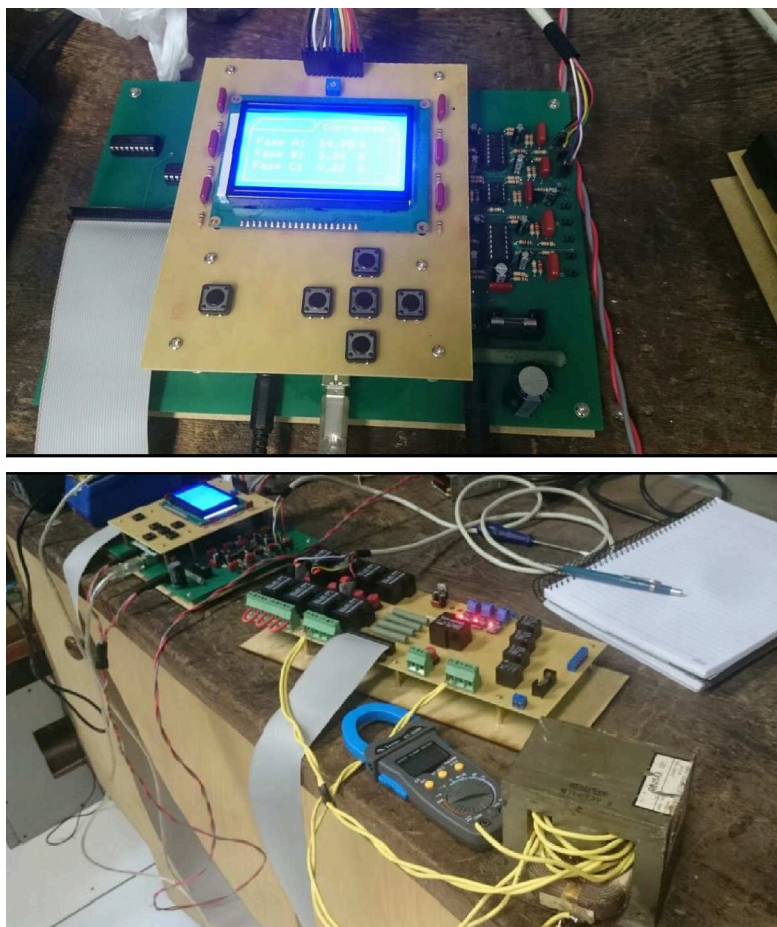
Fonte: Barbian, 2013.

momento em que relés são chaveados e novos curtos-circuitos podem surgir nos ramos do circuito onde estão os sensores, é executado o comando de leitura do sinal. O primeiro passo para o microcontrolador consiste em aguardar alguns instantes para estabilizar qualquer processo transitório das correntes da máquina. Neste caso, espera-se um tempo de 500 ms, que equivale a 30 ciclos de onda do sinal.

Após a espera, o microcontrolador irá amostrar o sinal ao longo de diversos períodos de 50 ms. Um período de 50 ms engloba 3 ciclos de onda do sinal original e representa uma frequência de 20 Hz. Desta forma, qualquer sinal de interfe-

rência de baixa frequência (entre 60 Hz e 20 Hz) poderia ser percebido (e ignorado) dentro deste período de amostragem. A partir de cada período de 50 ms serão guardados 1 valor máximo e 1 valor mínimo de amplitude do sinal. Esse período de amostragem será repetido diversas vezes para gerar diversos valores máximos e mínimos, sendo que neste caso foram usados 12 períodos. Após o último período de amostragem, os 12 valores máximos e os 12 valores mínimos serão analisados e destes serão descartados os 2 valores mais extremos. Com os 10 valores restantes, faz-se uma média aritmética. Ao final deste processo que leva 600 ms, o programa terá obtido 1 valor máximo e 1 valor mínimo relativamente estáveis da onda, lembrando que ruídos de frequências altas são filtrados pelo circuito amplificador, que possui um filtro passa-baixa. Com estes métodos espera-se filtrar todos os ruídos relevantes que levariam a uma leitura muito incorreta do sinal do sensor.

Figura 39 – Montagem do ensaio de comparação com equipamento comercial.



Fonte: Do autor.

A partir dos valores máximo e mínimo, o microcontrolador poderá realizar a interpretação do sinal do sensor para fornecer um valor de corrente. Primeiramente, é diminuído o valor mínimo do valor máximo e a resultante é dividida por dois, para gerar o valor de pico independentemente da

componente DC da onda. O valor de pico da onda, que até então está numa escala de 0 a 1023 bits (entradas analógicas do microcontrolador em questão trabalham na escala de 2^{10} bits), é convertido para uma escala de 0 a 5000 mV. Finalmente, é executada a divisão do valor de pico pela constante de sensibilidade (que varia para cada sensor). A resultante deste processo expressa a corrente elétrica eficaz que circula pelo sensor.

Importante observar que a constante de sensibilidade levantada neste projeto já leva em conta o valor eficaz da onda, pois se aplica para o caso de ondas senoidais. Existem sensores comerciais que fornecem tal sensibilidade atrelada ao valor máximo da onda. Nestes casos, se é desejado obter valor de corrente eficaz, é necessário ainda aplicar a relação entre valor máximo e valor eficaz, que para senoides é igual a $\sqrt{2}$.

A tabela 4 expõe os valores obtidos neste ensaio, valores que podem ser visualizados nos gráficos da figura 40. Nesta tabela, os valores de erro na medição de cada sensor são em relação à medida fornecida pelo instrumento comercial. Na figura 39, pode-se observar a montagem utilizada neste ensaio. Como instrumento de medida comercial, usou-se um alicate amperímetro da marca Minipa, de modelo ET-3388.

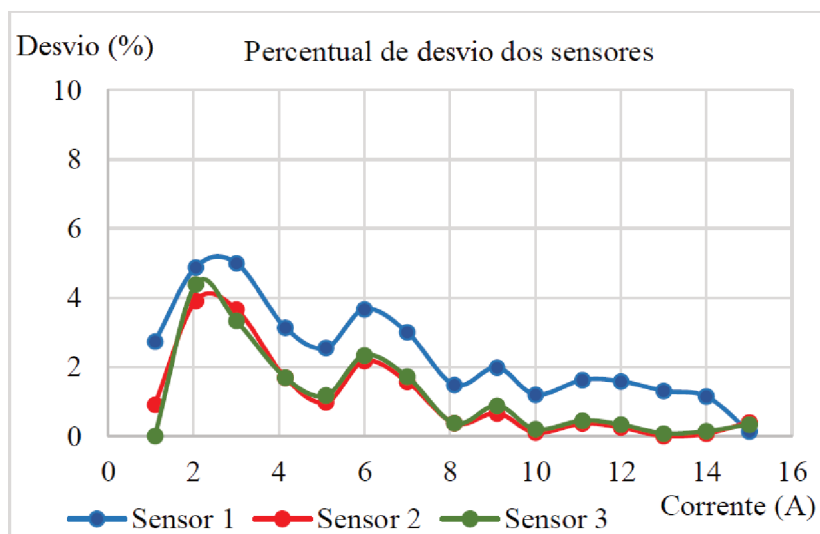
Observa-se na figura 40 que o TCT tem maior precisão conforme a corrente medida aumenta. Uma das razões para isso acontecer é porque a sensibilidade usada pelo microcontrolador para calcular a corrente foi definida baseada na faixa de altas correntes. Desta maneira, para medidas de valores baixos de correntes, as diferenças aumentam até aproximadamente 5 %, o que ainda está dentro da faixa de tolerância para esta aplicação. Para medidas de correntes mais altas, a diferença não chega a 2 %.

Tabela 4 – Correntes medidas no ensaio de comparação do sensor com um instrumento comercial.

Corrente medida pelo instrumento comercial (A)	Corrente medida sensor 1 (A)	Desvio sensor 1 (%)	Corrente medida sensor 2 (A)	Desvio sensor 2 (%)	Corrente medida sensor 3 (A)	Desvio sensor 3 (%)
1,10	1,13	2,73	1,11	0,91	1,10	0,00
2,05	2,15	4,88	2,13	3,90	2,14	4,39
3,00	3,15	5,00	3,11	3,67	3,10	3,33
4,15	4,28	3,13	4,22	1,69	4,22	1,69
5,10	5,23	2,55	5,15	0,98	5,16	1,18
6,00	6,22	3,67	6,13	2,17	6,14	2,33
7,00	7,21	3,00	7,11	1,57	7,12	1,71
8,10	8,22	1,48	8,13	0,37	8,13	0,37
9,10	9,28	1,98	9,16	0,66	9,18	0,88
10,00	10,12	1,20	10,01	0,10	10,02	0,20
11,10	11,28	1,62	11,14	0,36	11,15	0,45
12,00	12,19	1,58	12,03	0,25	12,04	0,33
13,00	13,17	1,31	13,00	0,00	13,01	0,08
14,00	14,16	1,14	13,99	0,07	14,02	0,14
15,00	15,02	0,13	14,94	0,40	14,95	0,33

Fonte: Do autor.

Figura 40 – Representação gráfica dos desvios dos sensores.



Fonte: Do autor.

6 CONCLUSÃO

A automação de processos manuais costuma fornecer segurança, praticidade e eficiência. Buscando estas características, projetou-se um sistema automatizado de imposição de faltas em máquinas síncronas que recebe comandos de usuários e atua por meio de chaves eletromecânicas. Por motivos de segurança, projetou-se ainda um sensor de corrente elétrica que pudesse alimentar o sistema com informações confiáveis.

O sistema inteiro foi construído, aplicando todos os chaveamentos contemplados pelo projeto. Existem dezenas de opções a serem selecionadas pelo usuário, que fornecem centenas de combinações de faltas a serem impostas na máquina. Tendo em mente quais chaveamentos o usuário deseja executar, e conhecendo o sistema, em poucos segundos quaisquer opções podem ser selecionadas e executadas.

Este projeto também implementou um sensor que pudesse medir correntes eficazes de valores entre 7,5 e 15 A, para monitorar ramos do circuito da máquina síncrona e identificar correntes acima de valores permitidos. Com a sensibilidade obtida, que permanece relativamente constante para os valores de correntes aplicados neste trabalho, e com as medições apresentando desvios abaixo de 10 %, pode-se concluir que o sensor de corrente funciona adequadamente para a aplicação em questão.

O sistema completo, com a junção de todos os componentes necessários, é compacto o suficiente para que seja instalado na máquina para qual foi projetado. Seu uso simples, com opções de imposição de faltas pré-definidas, chaveamentos rápidos e sincronizados e monitoramento de correntes, fornece mais segurança e praticidade em relação ao modo anteriormente utilizado, onde chaves eram acionadas manu-

almente. Portanto, as especificações para o sistema foram cumpridas.

6.1 CONTINUIDADE DO TRABALHO

Mesmo tendo atingido os resultados desejados, existe a possibilidade de implementar mudanças e melhorias. Caso se desejar replicar o sistema aqui exposto, ou ainda complementá-lo, aponta-se algumas melhorias que podem ser aplicadas no sensor de corrente desenvolvido:

- Núcleo e espiras: a sensibilidade do sensor poderia mudar significativamente com a introdução de um material ferromagnético no núcleo (região central das bobinas). Além de aumentar a sensibilidade do sensor, é possível que a sensibilidade variasse menos para diferentes valores de corrente. Outro fator que poderia ajudar nesta característica seria a disposição física das bobinas, já que existem diferentes maneiras de acoplar magneticamente as bobinas primária e secundária. Se essas mudanças melhorassem a sensibilidade do sinal vindo da bobina secundária do sensor, o ganho do amplificador poderia ser menor, resultando em menores distorções do sinal original e aumentando também a imunidade a ruídos e interferências. O aumento do número de espiras do secundário também afetaria diretamente a sensibilidade.
- Montagem do sensor: como as bobinas foram todas enroladas manualmente, os sensores não apresentam comportamentos idênticos. Com um processo de montagem mais preciso haveria uma diminuição da diferença de sensibilidade entre sensores. Existem equipamentos para enrolar bobinas, por exemplo.

- Componentes eletrônicos: houve variações observadas entre os 9 módulos de filtragem e amplificação. Julga-se que este fato provém de diferenças entre valores de componentes eletrônicos empregados. Seria interessante utilizar componentes de precisão.
- Blindagem: como pode ser observado na foto do sensor, não existe nenhum material em volta do mesmo que faça uma blindagem eletromagnética a fim de evitar ruídos e interferências nas medidas, especialmente interessante para aplicações em ambientes com campos magnéticos intensos. Foi possível implementar esta melhoria apenas na conexão entre a bobina secundária do sensor e o circuito amplificador, que foi feita com condutores blindados.
- Sensibilidade constante: no microcontrolador usado, a interpretação do sinal de tensão é feita a partir de uma sensibilidade constante (no caso do primeiro sensor analisado foi usada a sensibilidade de 150 mV/A). Mas, para casos onde é interessante ter uma interpretação mais precisa do sinal, em especial para baixas correntes, seria interessante considerar uma curva de sensibilidade.
- Interpretação do sinal do sensor: o método para interpretar o sinal do sensor de corrente aplicado neste sistema faz uso apenas dos valores máximos e mínimos do sinal amostrado pelo microcontrolador. Seria interessante utilizar todos os pontos amostrados e reconstruir totalmente o sinal, calculando seu valor eficaz pelo método tradicional, por meio da integração do sinal ao longo de um período.
- Análise econômica: seria interessante fazer um levantamento preciso dos custos de todos os componentes

utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Além disso, comparar o gasto final do projeto caso fossem usados sensores comerciais no lugar dos sensores desenvolvidos.

- Análise de segurança: desenvolver um plano de manutenção do sistema, baseado na vida útil dos componentes usados e nos problemas que surgiriam caso algum componente falhasse.

REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, C.; SADIKU, M. **Fundamentals of Electric Circuits**. 5a Edição. Nova Iorque, 2013.
- ALLEGRO MICROSYSTEMS, INC. **ACS712-Datasheet**, 2017. Disponível em: < <https://www.allegromicro.com/en/Products/Current-Sensor-ICs/Zero-To-Fifty-Amp-Integrated-Conductor-Sensor-ICs/ACS712.aspx> >. Acesso em 10/05/2018.
- ALMEIDA, Rodrigo. **Leitura de chaves mecânicas e o processo de debounce**, 2014.
- BARBIAN, Eduardo. **Conheça os tipos de no break**, 2013. Disponível em: < <https://www.oficinadanet.com.br/post/10738-conheca-os-tipos-de-no-break> >. Acesso em 10/05/2018.
- BASTOS, João Pedro Assumpção. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática**. Edição da UFSC, 2008.
- CHRISTOFFERSEN, Jens. **Switch Bounce and How to Deal with It**, 2015.
- CROMATEK. **CTK 1C 12VDC: Rele miniatura de uso geral-Datasheet**. Disponível em <http://cromatek.com.br/site/components/com_jshopping/files/demo_products/CTK_1C_12VDC_Rev03.pdf>. Acesso em 20/05/2018.
- EQUACIONAL, Elétrica e Mecânica. **Manual geral de instruções: Grupo gerador especial**, 2014.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl.

Fundamentals of physics. 10ª Edição. Nova Iorque: Wiley, 2014.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física, volume 3: eletromagnetismo.** 9ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HENRYS, Bench. **Henrys Bench**, 2015. Disponível em: < <http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-current-measurements/acs712-current-sensor-user-manual/>>. Acesso em 10/05/2018.

HODGES, David A. **Darlington's Contributions to Transistor Circuit Design**, 1999. Disponível em: <<https://people.eecs.berkeley.edu/~hodges/DarlingtonCircuit.pdf>>. Acesso em 20/05/2018.

JONNES, Jill. **Empires of light: Edison, Tesla, Westinghouse, and the race to electrify the world.** Random House Trade Paperbacks, 2004.

LATHI, Bhagwandas Pannalal. **Sinais e Sistemas Lineares.** 2ª Edição. Bookman, 2006.

MONK, Simon. **Programação com Arduino: começando com Sketches.** Bookman Editora, 2017.

NOCETI FILHO, Sidnei. **Filtros seletores de sinais.** Editora da UFSC, 1998.

PROBOTS, Techno Solutions. **Probots**, 2017. Disponível em: < https://probots.co.in/index.php?main_page=product_info&products_id=841>. Acesso em 10/05/2018.

RIGONI, Mauricio. **Desenvolvimento de um sistema de detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio do campo magnético externo**, 2014.

ROBOTPARK, Robotic Technology Center. **Robotpark**, 2015. Disponível em: <<http://www.robotpark.com/Arduino-MEGA-2560-En>>. Acesso em 10/05/2018.

SANTOS, Helton Fernando dos. **Desenvolvimento de um equipamento para monitoração de geradores síncronos através do campo magnético externo**, 2016.

STMICROELECTRONICS. **L7800 series: Positive voltage regulators-Datasheet**. Disponível em: <<http://www.baudaeletronica.com.br/Documentos/L78XX.pdf>>. Acesso em 20/05/2018.

TE CONNECTIVITY. **T90 Series, 30A PCB Relay-Datasheet**. Disponível em: <<http://www.eletródex.com.br/rele-ht2150-t90-6t-20a-jqx-15f.html>>. Acesso em 20/05/2018.

TEIXEIRA, Leandro Lettieri. **Medidor de energia eletrônico**, 2009.

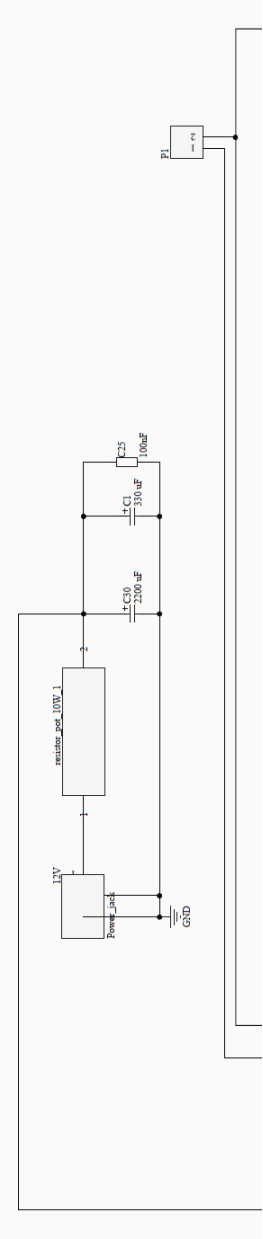
TEXAS INSTRUMENTS. **ULN2803A Darlington Transistor Arrays**. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2803a.pdf>>. Acesso em 20/05/2018.

WENDLING, Marcelo. **Amplificadores Operacionais**, 2010. Disponível em: <<http://www2.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/3—amplificadores-operacionais-v2.0.pdf>>. Acesso em 20/05/2018.

APÊNDICE A – Circuito de tratamento dos sinais dos sensores de corrente

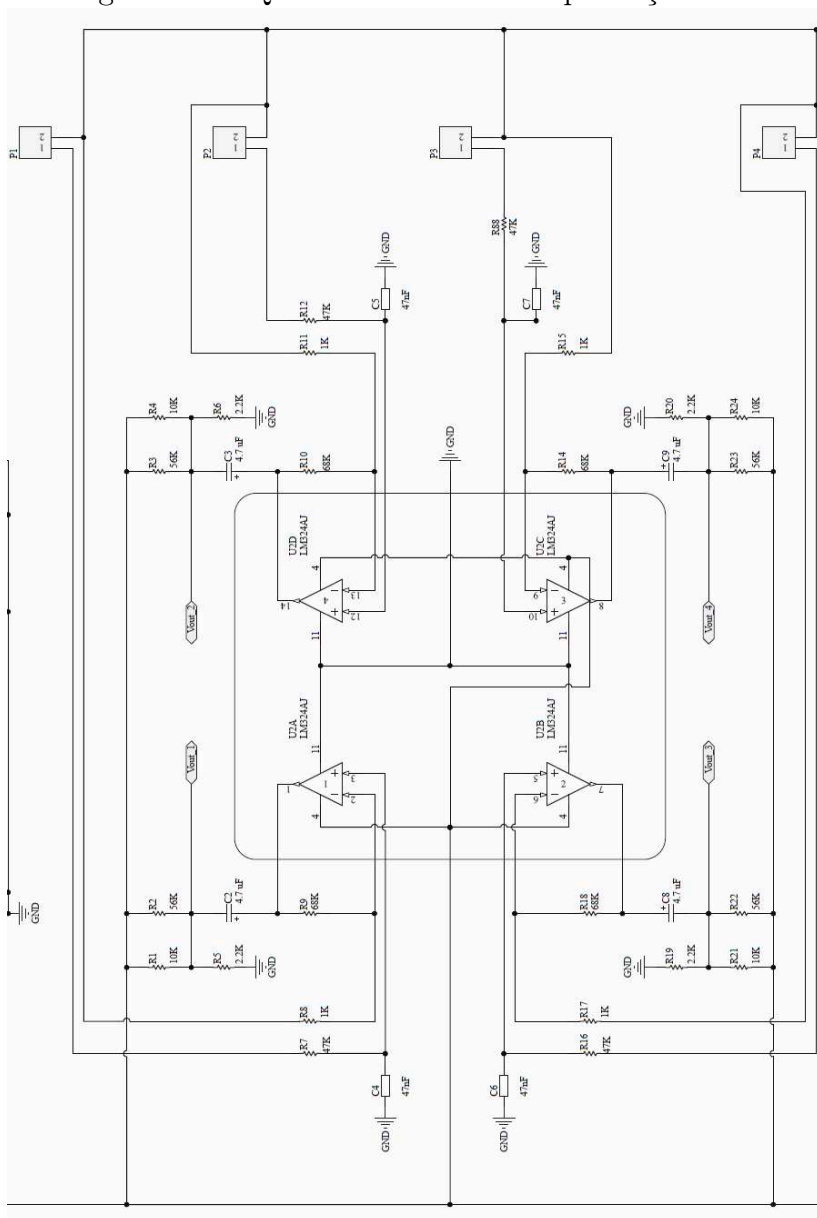
A seguir encontra-se o esquemático completo do circuito implementado para tratamento dos sinais dos sensores de corrente. O esquemático foi dividido em quatro figuras para facilitar a visualização.

Figura A.1 - Alimentação do circuito.



Fonte: Do autor.

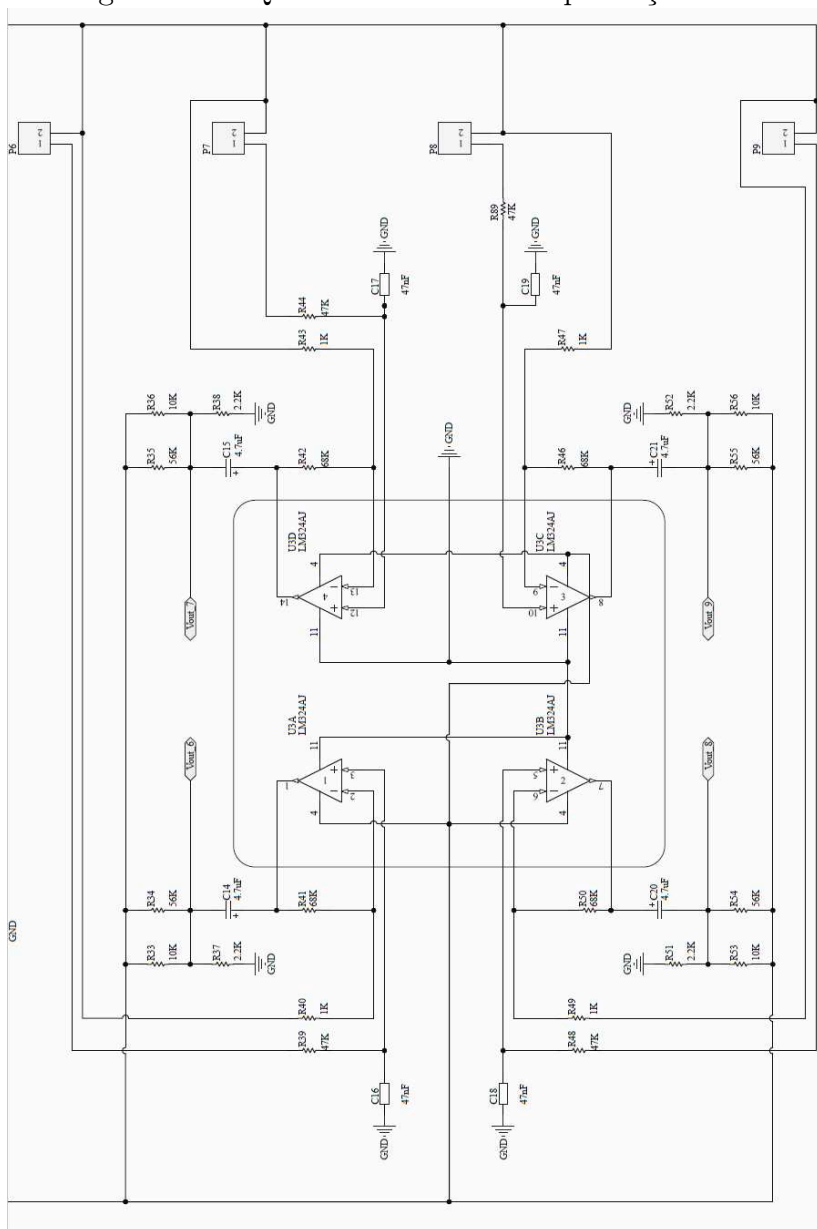
Figura A.2 - Quatro módulos de amplificação.



Fonte: Do autor.



Figura A.4 - Quatro módulos de amplificação.



Fonte: Do autor.